

工學碩士 學位論文

造船用 Primer코팅鋼板의 CO<sub>2</sub>레이저 熔接時  
熔接缺陷의 形成 메카니즘과 抑制方法

Formation Mechanisms and Suppression Method of Weld  
Defects in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Primer-coated  
Steel for Shipbuilding

指導教授 金 鍾 道

2004年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 關 工 學 科

朴 炫 俊

本 論 文 을 朴 炫 俊 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

主 審 工 學 博 士 李 明 勳 

副 審 工 學 博 士 金 允 海 

副 審 工 學 博 士 金 鍾 道 

2004 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 關 工 學 科

朴 炫 俊

# 목 차

Abstract

<b>1. 서 론</b> .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 목적 .....	3
<b>2. 이론적 배경</b> .....	5
2.1 용융아연도금강판의 적용현황과 특성 .....	5
2.1.1 용융아연도금강판의 적용현황 .....	5
2.1.2 용융아연도금강판의 피막조직 .....	6
2.1.3 용융아연도금강판의 내식성 .....	8
2.2 산업용 레이저의 발전 원리와 특성 .....	13
2.2.1 레이저의 발전 원리 .....	13
2.2.2 산업용 레이저의 특성 .....	19
<b>3. 실험 장치 및 방법</b> .....	28
3.1 실험재료와 CO <sub>2</sub> 레이저 용접법 .....	28
3.1.1 실험재료 .....	28
3.1.2 CO <sub>2</sub> 레이저 용접장치와 용접방법 .....	30
3.2 용접금속부의 기공과 증발입자의 조성 분석방법 .....	36
3.2.1 용접금속내 기공의 조성 분석방법 .....	36
3.2.2 증발입자의 포집 및 조성 분석방법 .....	36

4. 실험 결과 및 고찰 .....	38
4.1 Primer 코팅강판의 용입 및 용접결함의 특성 .....	38
4.1.1 집광광학계의 비초점 거리변화에 따른 용입특성 .....	39
4.1.2 용접속도 및 primer코팅조건에 따른 용접특성 .....	49
4.2 Lap welding에 있어서 용접특성에 미치는 primer코팅조건 및 gap간극의 영향 .....	79
4.2.1 Primer 코팅위치 및 코팅두께에 따른 용접특성 비교 .....	79
4.2.2 용접특성에 미치는 gap간극의 영향 .....	89
4.3 용접금속부의 기공과 증발입자의 조성 .....	104
4.3.1 용접금속부의 강제과단에 의한 기공의 조성분석 .....	105
4.3.2 비드표면에 형성되는 부유물질의 성분분석 .....	113
4.3.3 증발입자의 조성분석 .....	117
4.4 레이저 용접현상의 고속도 계측 .....	121
4.4.1 고속도 비디오 카메라를 이용한 용접현상의 계측방법 .....	121
4.4.2 Gap간극의 유무에 따른 유기플라즈마와 스파터의 동적 거 동 .....	123
4.5 기공 및 스파터의 발생 메카니즘과 억제방법 .....	127
5. 결 론 .....	130
참고문헌 .....	133

# **Formation Mechanisms and Suppression Method of Weld Defects in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Primer-coated Steel for Shipbuilding**

**Hyun-Joon, Park**

**Department of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University**

## **Abstract**

Laser are now established as industrial tool that cut, weld, drill and modify the surface properties of materials. Laser-processes offer many advantages over conventional processes e.g. speed, quality, and increased production. The use of zinc-coated steel in automobile industries as well as in various industry fields has increased due to low price and high corrosion resistance.

Recently the laser welding technology has been considered the application for shipbuilding structure. However, when this technology is applied to primer-coated steel, good quality weld beads are not easily obtained. Because that the primer-coated layer caused the spatter, humping bead and porosity, that are main part of the weld defects, attributed to the powerfully vaporizing pressure

of zinc.

We were performed experiment with objectives of understanding spatter and porosity formation mechanism and producing sound weld beads in 6mm<sup>t</sup> primer coated steels by a CO<sub>2</sub> CW laser. The effects of welding parameters; defocused distance, welding speed, coated thickness, coated position; were investigated in the bead shape and penetration depth in bead and lap welding.

Laser welding of zinc-coated steel in lap joint leads to a problem that is related to the low boiling point of zinc(907 °C) compared with high melting point of steel(1530 °C). When the keyhole penetrates at the interface between the two sheets in lap joint, the layer rises to a very high temperature. At this temperature, the zinc vapour pressure is so high that it explodes out of the melt pool and generated the spatter and humping bead. Namely serious 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.

And mechanism of porosity formation has searched by analysis the composition of inner surface of porosity and the vaporizing particle according to weld conditions. There is a lot of zinc in inclusion of inner surface of porosity. But there is not zinc in dimple structure. These results are indicated that the porosity was formed by zinc vaporized pressure.

Then, the dynamic behaviors of laser-induced plasma and spatter phenomena were photographed by high speed video camera during CO<sub>2</sub> CW laser welding with gap or no-gap clearance. Laser-induced plasma has been accompany with the vaporizing pressure of zinc ejecting from keyhole to surface of primer coated plate. In result, the weld defects such as spatter, porosity and humping bead have formed. This dynamic behavior of plasma was very unstable and this instability was closely related to the unstable motion of keyhole during laser welding. Therefore, as observing the behavior of plasma, it should be estimated how the keyhole was fluctuated and the weld defect was formed.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

자동차 산업에서는 자동차 내·외판의 내식성, 성형성, 용접성 등을 고려하여 많은 표면처리 강판이 현재 개발되어 이용되고 있다. 예를 들면, 전기 아연도금 및 내식성을 중심으로 개발된 합금화 용융 아연도금, 순아연의 전기 도금, 수배의 내식성이 있는 Zn-Ni 합금 전기도금, 그리고 Ni-Zn 합금도금의 표면에 얇은 유기 피복처리가 된 유기복합 피복강판 등이 그 대표적인 경우이다.

한편, 레이저 열원은 고속·저입열 용접으로 열영향부가 좁고 열변형이 작다는 점, 비접촉식 가공이므로 공구의 마모가 적다는 점, 전자빔 용접에 비하여 진공실을 필요로 하지 않으며 X선방사의 위험성이 없다는 점 등을 고려하여 자동차 조립 공정 등에 많이 적용되고 있다. 미러(mirror) 전송에 의한 테일러드 블랭크(Tailored blank) 기술과 같은 비교적 직선·평면적인 맞대기 용접부품의 생산에도 서구를 비롯한 일본 등의 선진국에서는 이미 레이저 열원의 실용화가 이루어지고 있다<sup>1~5)</sup>. 더욱이 YAG 레이저의 출력이 최근에 이르러 고출력화가 이루어짐으로서 실용화의 가속도를 더하고 있다<sup>6~12)</sup>. 또한 기존의 용접법과 접목한 하이브리드 용접과 같이 용접 효율을 높이는 새로운 용접법도 개발이 진행되고 있으며<sup>13~15)</sup>, 레이저의 특성을 이용한 수중용접에 까지 그 활용범위가 넓어지고 있는 추세이다<sup>16~18)</sup>.

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 Honeycomb plate나 Corrugated plate 등을 이용한 구조로 그 전환이 이루어지고 있는 단계에 이르고 있다. 이러한 박판 집합체를 용접구조로 만드는 경우, 아크용접은 용접변형 및 용접속도의 문제로 부적절함에 따라서 레이저 용접의 채택이 각국에서 앞다투어 검토되고 있다. 일본 운수성의 Techno-super liner project의 Model ship인 Gale(疾風)에 사용된 Corrugated plate제작법에 이미 레이저가 적용되고 있으며, TWI에서는 선박외판에 응용하고자 하는 기초연구가 이루어지고 있다는 점에서 좋은 예를 찾아 볼 수 있다<sup>19)</sup>. 국내의 대형 조선소 또한 이러한 세계적인 추세에 부응하여 레이저의 적용을 검토하는 단계에 이르렀으며 가까운 시일 내에 가시화가 이루어질 것으로 확신한다.

그러나, 국내의 관련 레이저 용접기술 수준은 도입초기 단계로써 관련 분야에서의 일부 실험이 이루어지는 것에 지나지 않고 있다. 이러한 원인에는 산업분야에서의 안이한 경쟁의식과 첨단 용접기술 열원에 대한 식견부족, 고정도(高精度)의 고속·저입열 용접에 따른 용접지배 인자의 제어가 어려운데 있다. 특히 아연도금 강판의 경우에는 모재에 비해 도금성분의 낮은 비점 때문에 합금원소의 증발거동과 모재의 용융거동, 그리고 기공 등의 결합형성기구가 일반 강재와 상이하여 그 메카니즘 이해와 용접품질 제어가 어렵기 때문에 용접시 균열과 기공 결합 등의 많은 문제점을 안고 있고 있는 것이 현재의 실정이다<sup>20~25)</sup>.

그러므로, 해양부식환경이라는 특이한 조건 속에서 국내 조선업체가 우선적으로 그 적용을 고려하게 될 조선용 primer코팅강판(6mm<sup>t</sup>)에 대하여, 레이저 빔 열원을 적용하여 용접을 수행할 때의 결합 형성 메카니즘과 그 억제 방법에 대한 검토가 시급한 것으로 고려된다.

## 1.2 연구 목적 및 내용

본 연구에서는 조선용 구조용강인 AH36의 primer 코팅강판(6mm<sup>t</sup>)에 대한 CO<sub>2</sub> CW 레이저 용접시 낮은 비점의 primer 성분에 기인하여 발생할 수 있는 스패터 현상 및 기공 등의 용접결함에 대하여 발생 메커니즘을 규명하고 그 대안책을 제시함으로서, 고정도(高精度)·고품위(高品位)의 신뢰성 높은 용접법 개발을 목표로 한다.

이러한 목표를 수행하기 위해서 우선 레이저 용접장치의 집광특성과 레이저 용접시의 가공인자를 추출하여 그 지배정도를 파악하였다. 그 다음 용접현상에 대한 단면 관찰, 재료학적 분석 및 고속도 관찰에 의하여 스패터 현상 및 기공 등의 용접결함과 키흔에 대한 형성 메커니즘을 규명함으로서 근본적인 대안책을 제시하고자 하였다.

연구의 진행은 다음의 4단계로 나누어서 체계적인 실험을 행하였으며, 그 결과에 근거하여 문제점에 대한 총괄적인 검토와 대안책을 제시하였다.

### (1) Primer코팅강판의 용입 및 용접결함의 특성

CO<sub>2</sub> CW 레이저의 집광광학계를 비롯한 실드가스의 노즐과 가스의 선정, 연구목적에 부합한 용접시험편의 지그(jig) 제작 등 주변장치의 변수를 고정하고, 이음 형상, 용접속도( $v$ ), primer코팅조건( $t_{pr}$ )의 변화에 따른 강의 용접특성에 대하여 세부적인 검토를 행하였다.

### (2) Primer코팅조건 및 gap간극의 영향

Lap welding시 많은 용접결함이 발생한 (1)항의 결과를 기초로 하여 lap welding의 조건에서 gap간극( $G_c$ ) 및 코팅위치의 변화에 따른 용접 특성 등을 평가하였다.

### (3) 용접금속내의 기공과 증발입자의 조성

용접 금속부를 강제 파단하여 기공결함의 조성과 기공 발생형상 등을 분석하고, 스패터 및 증발입자의 조성에 대하여 재료학적인 관점에서 검토하여, 기공결함의 형성에 미치는 영향을 간접적으로 평가하였다.

#### (4) 기공 및 스패터의 발생 메카니즘 분석

최대 촬영속도 10,000fps의 고속도 카메라를 이용하여 primer코팅두께 및 gap간극에 따른 유기플라즈마와 스패터의 동적 거동을 가시화하여 스패터의 발생시기와 형성 메카니즘을 파악하고, 지금까지의 연구 결과를 총괄하여 문제점에 대한 원인규명과 함께 결함의 억제 및 방지법에 대한 근본적인 대안을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 용융아연도금강판의 적용현황과 특성

#### 2.1.1 용융아연도금 강판의 적용현황

19세기 중엽 프랑스와 영국에서부터 시작된 용융아연도금은 뛰어난 방식효과와 경제성이 우수하여 선진 외국에서는 이미 구조물의 방식대책으로 가장 일반화되어 있는 방식법이다. 특히, 희생적 방식특성이 있는 아연이 철과 합금층을 이루며 견고히 부착되기 때문에 치밀한 보호피막을 형성하여 가장 이상적인 방식특성을 갖고 있다.

용융아연도금의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 도금표면에 형성된 치밀한 보호피막과 희생적 방식작용에 의해 내식성이 매우 우수하다.
- (2) 아연은 강재보다도 전기 화학적으로 표준전위가 낮기 때문에 발생하는 작용으로 Fig. 2.1에 보인 것과 같이 손상에 의해 철소지(iron matrix) 일부가 노출되어도 주변의 아연이 노출부를 보호하는 희생적 방식 작용을 한다.
- (3) 크기에 제약 없이 대부분의 제품에 적용 가능하다.
- (4) 철과 아연이 합금 층을 이루므로 부착력이 매우 우수하다.
- (5) 복잡한 구조의 절곡 형태나 좁은 틈에도 도금이 되므로 신뢰성 있는 완벽한 방식처리가 가능하다.
- (6) 강재 자체의 기계적 성질 변화가 거의 없다.
- (7) 법규상 필요한 도장 또는 주변과의 조화를 위해 다양한 페인트 처리가 가능하므로 그 적용범위가 매우 넓다.

(8) 시공현장에서 방식을 위한 도장처리가 필요 없으므로 건설공기를 대폭 단축시킬 수 있다.

(9) 다른 방청법과 비교하여 건설 초기비용에서도 충분히 경쟁력이 있으며, 특히 장기간 유지보수가 필요 없으므로 경제성이 훨씬 높다.

용융아연도금은 최근 건설비용에 못지 않은 막대한 유지보수비를 감안한다면 내구성, 경제성, 작업성 등 모든 분야에 걸쳐 그 우수성이 널리 인식되어 가고 있는 방식법으로서 대기중, 해수중, 토양중 또는 콘크리트 중에서 대단히 우수한 내식성을 나타낸다.

일반적으로 사용되고 있는 일반구조용 압연강재(SS계), 용접 구조용 강재(SM계), 주강, 주철 등 많은 철강재료에 사용되고 있다.

건축분야에서는 도금에 의한 기계적 강도의 변화가 없는 SS41, SM41, SM50 등의 강재가 널리 이용되고 있다. 강재류중 일반구조용 강재, 용접구조용 강재 등이 인장강도  $50\text{kgf/mm}^2$ 이하인 경우 양호한 도금을 얻을 수 있으나, 그 강재의 화학적 성분이나 제강법에 의해 철-아연의 반응속도가 크게 다르고 도금층의 두께, 외관이 달라지고 경우에 따라서는 밀착성에 이상을 초래하는 경우도 있다.

### 2.1.2 용융아연도금강판의 피막조직

일반적인 도금조건으로 볼 수 있는 도금조직은 Fig. 2.2와 같이 철소지에 가까운 방향으로부터  $\gamma$ 층(21~28%Fe),  $\delta$ 층(7~11%Fe),  $\zeta$ 층(5.8~6.7%Fe)의 합금 층과 순수아연 층인  $\eta$ 층(0.03%Fe)으로 형성되어 있다<sup>26,27</sup>.

(1)  $\gamma$ 층 : 철소지에 접하는 층으로 보통 대단히 얇은 층이다. 결정은 입방정계로  $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ 의 화합물로 생각할 수 있으며, 단단하여 부서지기

쉬운 성질을 가지고 있다. 경도는 마이크로 비커스 경도로 500 가까이 된다.(보통의 강재는 100~200) 다른 층과의 관계에서 이층은 식별되지 않는 것이 보통이다.

(2)  $\delta$ 층 : 통상의 도금피막에서는 가장 내부에서 볼 수 있는 것으로 치밀한 조직을 가지며 인성이 풍부하다. 결정은 복잡한 육방정형으로  $FeZn_7$ 의 화합물로 생각할 수 있으며, 철의 함유량은 7~11%이다. 경도는 마이크로 비커스로 250 이상인 것으로 알려지고 있으며, 철의 함유량도 많기 때문에 이층까지 부식이 진행된다면 반점상태로 적갈색을 띠는 경우도 있지만 강재 자체의 붉은 녹과는 다른 것이다.

(3)  $\zeta$ 층 : 피막 중에서 가장 현저한 결정을 가지며 주상조직이다. 도금의 부착두께가 많을 때는 이층이 두터울 경우가 많다. 이층은 다른 층과 비교하여 결정이 대칭성이 낮고 결합이 약하기 때문에 무르고 가공할 경우에 균열이 발생하기 쉽다. 경도는 마이크로 비커스로 200 전후이다. 조성은  $FeZn_{13}$ 이며, 철의 함유량은 6% 정도이다.

(4)  $\eta$ 층 : 이것은 용융아연욕으로부터 강재를 인양할 때 부착되는 것으로 결정은 순아연과 같은 조밀 육방정계에 속하고, 부드럽고 연성이 풍부하여 변형가공을 받아도 찢어지는 일이 없다. 아연순도가 98.5%이고, 도금로 성분 에 의한 Pb이 1%정도 포함되는 것이 보통이며 경도는 50 이하이다.

이상의 각 층이 철소지로부터 연속하여 형성되어 있기 때문에 밀착성이 대단히 우수하다. 또 도금한 제품의 외관은 오로지 가장 외층의  $\eta$ 층에 의한 것이고, 도금 직후는 광택을 갖지만 수개월 경과하면 광택을 잃고 회색으로 변해 가는 것이 보통이다. 이것은 염기성 탄산아연 등을 주성분으로 하는 고내식성의 보호피막이 도금표면에 형성되어

있기 때문이고 성능상 전혀 문제가 되지 않는다. 철과 아연이 반응하면, 철과 아연의 함량, 반응온도 등의 조건에 따라 위에서 설명한 것과 같이  $\eta$ ,  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$ 상 등이 나타난다.  $\eta$ 상은 철이 거의 고용되어 있지 않은 순수한 아연이며 이  $\eta$ 상이 철과 여러 가지 반응을 하여  $\zeta$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ 상 등이 생성된다.

1단계에서 소지철과 도금욕이 반응하여 Fe-Zn화합물인  $\zeta$ 상이 생성된다. 2단계에서는  $\zeta$ 상이 성장하면서  $\zeta$ -Fe 계면에 존재하는  $\zeta$ 상의 Fe농도가 증가함에 따라  $\delta$ 상이 나타난다. 3단계에서는  $\delta$ 상에서 Zn이 Fe측으로 확산하여  $\gamma$ 상을 형성한다. 4단계에서는  $\delta$ 상이 성장하면서 치밀한  $\delta_c$ 와  $\delta_p$ 상의 2층으로 관찰된다. 5단계에서는  $\delta_p$ 상이 급성장하게 된다. 530°C 이상의 온도에서는 짧은 시간동안 1-5단계를 완료하고, 침지시간이 증가함에 따라  $\delta_p$ 상이 붕괴되면서  $\delta_c$ 상과 아연이 혼합된  $\delta_d$ 상이 생성 성장하는 6단계가 존재하게 된다. 특히 고온인 590°C에서는  $\delta_d$ 상이 소멸되어  $\delta_c$ 상과  $\gamma$ 상만이 존재하는 최종단계가 있다.

### 2.1.3 용융아연도금강판의 내식성

#### (1) 용융아연도금강판의 내식성

아연금속은 본래 대단히 활성인 양성금속으로 부식하기 쉬운 성질을 가지고 있지만 표면에 치밀한  $Zn(OH)_2$ 나  $ZnO$ 의 부동태 피막을 형성하거나 불용성의 염기성 탄산아연 피막을 만들기 때문에 강한 내식성을 나타낸다. 그러나 이러한 피막의 생성을 방해하기도 하고 또 용해성 박막을 생성하는 환경 하에서는 아연도금은 급속히 부식된다. 따라서 부식환경이 열악한 경우에는 아연도금 위에 도장 등으로 2중 방식

할 필요가 있다. 이처럼 아연도금은 사용되는 환경에 의해 내식성은 큰 변화를 갖게되며 아연도금제품을 사용하는 강구조물을 설계할 때 그 주변환경을 확인하는 것에 의해 각 환경하의 각지에서 실시된 시험 결과로부터 구조물의 내용년수를 추정하는 것이 가능하다. 대기중의 내용년수를 예측하는 경우 사용환경에 의한 도금의 부식속도와 아연부착량으로부터 다음과 같이 계산한다.

$$\text{내용년수} = \frac{\text{아연부착량}(g/cm^2)}{\text{부식속도}(g/m^2/year)}$$

대기중의 아연도금은 대기오염물질의 아황산가스, 산화 등에 의해 그 내식성이 크게 좌우되고 부식인자로 다음과 같은 것이 있다.

- 습기와의 접촉시간과 온도
- 표면의 건조속도
- 대기중의 공업오염물질 및 해수의 염분

위와 같이 사용 환경이나 조건에 의해 내식성은 달라지지만 아연도금 부착량에 비례하여 내용년수는 증가하며, 동일환경 하에서 실내는 실외에 비해 3~5배의 내용년수를 기대할 수 있다.

이 식은 아연피막이 10%가 남아있는 시점에서 철소지로부터 녹이 발생한다고 가정한 값이다.

일본 도로공사의 자료에 의하면 교량의 경우 주요 부재의 년 평균 아연도금 부식막 두께 감량은 약  $1.85\mu\text{m}/\text{년}$ 으로 동일한 속도로 부식이 진행될 경우 아연부착량  $600\text{g}/\text{m}^2(84\mu\text{m})$ 의 90%가 부식된 경우 41년(84

$\times 0.9/1.85=41$ 년)의 내용년수가 산출된다. 하지만 실제적으로  $200\mu\text{m}$  이상의 아연도금 막두께로 작업이 가능하여 실제 교량은 상당한 내용년수를 가지고 있다.

## (2) 다양한 부식환경에서의 내식성

### ① 수중의 내식성

수중에 있어서의 내식성은 아연도금 표면과 물의 접촉으로 아연표면에 생성하는 수산화물에 대한 물의 영향에 의해 지배된다. 이 경우에 아연의 부식에 영향을 미치는 요인은 수중의 가스, 무기염류, pH, 침적시간, 온도, 정지수와 유수 등이다. 예를 들면, 신선한 자연수 중에서의 아연의 부식속도는 아연과 그 내식성에 의하면 경수에서  $2.5\text{mg}/\text{dm}^2/\text{일}$ , 연수에서는  $25\text{mg}/\text{dm}^2/\text{일}$ 이고 경수는 부식방지에 유효한 부착피막을 부착시키기 때문에 일반적으로 부식성은 좋지 않다. 다른 일반금속과 같이 아연의 부식속도는 수중에의 통기에 의해 증가하고 수중에 용해하고 있는 산소와 이산화탄소는 부식속도를 증가시킨다. 도금의 내용년수를 일반적으로 표시하는 것은 곤란한 점이 있지만 여러 가지 요인을 감안하면 부식속도는  $30\sim 100\text{g}/\text{m}^2/\text{년}$ 으로 추정할 수 있다.

### ② 해수중의 내식성

해수 중에서의 내식성은 침적시간이 길게 되면 부식속도는 감소하게 된다. 이것은 해수 중에 포함된 마그네슘, 칼슘염이 보호작용을 하기 때문이다. 이 시험으로부터 용융아연도금의 해수 중에서의 부식속도는 약  $100\text{g}/\text{m}^2/\text{년}$  정도인 것을 알 수 있다. 그러나 유동하는 해수에 계속 접촉되거나 비말에 의해 건조되지 않는 환경에서는 일반적인 해수 중

에서 보다 부식속도가 2~3배 빨라지고 이러한 열악한 부식환경에서는 용융아연도금에 의한 방식만이 아니라 용융아연도금 위에 에폭시도장 등의 2중 방식이 필요하다.

### ③ 토양중의 내식성

토양 중에서 부식을 지배하는 주 인자는 통기성, 함유량, 용존물질의 종류와 전기전도도, pH 등이다. 일반적으로 통기성이 나쁘고 수분이 많고, 염분이 있으며, pH가 높거나 낮을 경우, 산소가 많을 경우 부식이 빠르다. 토양 중에서의 아연피막의 내식성은 미국의 National Bureau of Standards에서의 광범위한 실험에 의하면  $610\text{g}/\text{m}^2$ 의 피막은 무기질산화토양 중에서 16년 이상의 방식능력이 있다.  $915\text{g}/\text{m}^2$ 의 피막은 대부분의 무기질환원성 토양에서는 10~13년의 방식성능을 갖는 것으로 보고하고 있다. 이 토양종별은 초목이 덮여진 장소가 50% 미만일 경우를 무기질로 하고 또 농업용지와 같이 배수성이 좋고 일반적으로 밝은 색 토양을 산화성, 지표 바로 밑의 습윤한 토지로 밝은 색의 토양을 환원성이라 한다.

### ④ 콘크리트중의 내식성

콘크리트 내는 통상 pH12~13으로 철근은 부동태의 상태에 있고 장기간 사용에 견디는 것이 가능하지만 근년 하천의 모래를 구하는 것이 곤란해짐에 따라 바다모래를 사용하는 빈도가 높아지는 것으로부터 염분을 함유하는 콘크리트가 많아지고 철근 콘크리트의 중성화에 무관하게 pH12의 상태에서도 조기에 철근의 부식이 발생하고 녹에 의한 체적의 팽창에 의해 콘크리트에 균열이 발생하여 더욱 부식이 진행되게

된다. 그러나 용융아연도금한 철근은 아연피막으로 보호되어 있기 때문에 녹의 발생이 없어 콘크리트를 손상하지 않는다. 콘크리트와 용융아연도금피막과는 부착성이 좋아서 송전철탑, 철강구조물의 기초부재, 도로교의 철근 등 많은 용융아연도금제품이 콘크리트 중에 사용되고 있다.

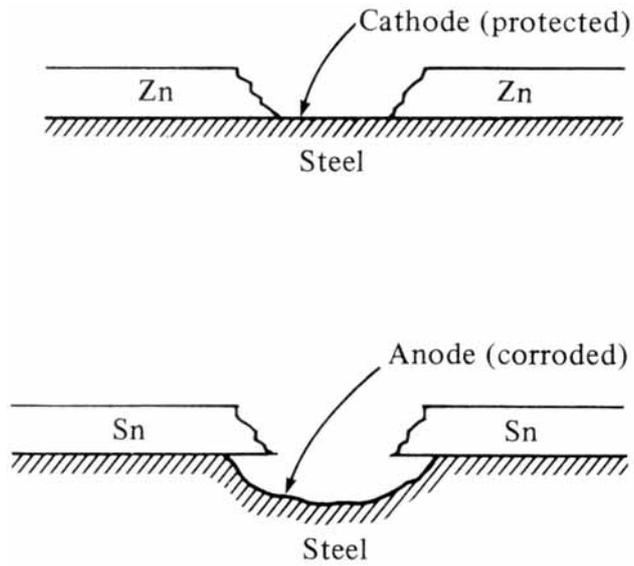


Fig. 2.1 Protection of steel by Zn

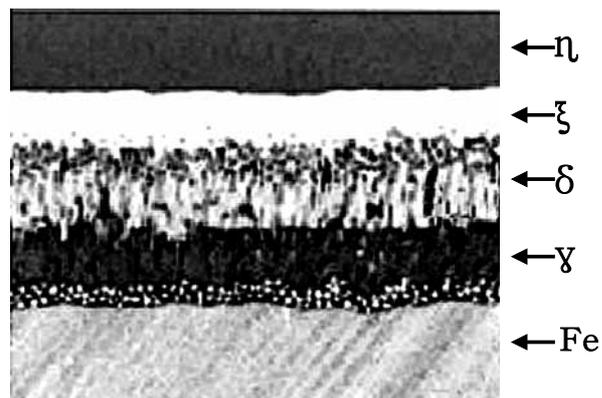


Fig. 2.2 Structure of hot-dip galvanized steel

## 2.2 산업용 레이저의 발진 원리와 특성

### 2.2.1 레이저의 발진 원리

레이저는 여기상태의 원자나 분자를 외부에서 자극시켜 에너지와 위상이 고른 광을 방출하게 함으로서 크게 증폭된 광을 말한다. 이 레이저 (LASER)는 Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation의 머리글자를 따서 만들었는데 이는 “방사의 유도방출에 의한 광의 증폭”을 뜻한다.

일반적으로 주파수의 범위가 넓은 자연광의 경우 렌즈를 사용하여 아주 가늘게 만들 수는 있지만 곧 크게 퍼져 버린다. 또한 주파수에 따라 굴절률이 다르기 때문에 자연광은 한 점에 집광 시킬 수 없다.

이에 반하여 레이저는 좁고 긴 관을 거의 무한하게 왕복한 광이기 때문에 지향성이 좋으며, 공진기의 양쪽 미러를 통하여 공명상태의 광을 방출하므로 에너지와 위상이 일정하여 가간섭성(coherent)이 우수한 광이다. 또한 전자기 스펙트럼의 폭이 좁으므로 렌즈를 이용한 집광성이 우수하여 단위면적당 에너지의 밀도를 크게 높일 수 있는 특성이 있다.

레이저가 동작하기 위해서는 세 가지의 기본 조건을 만족시켜야 한다. 첫째는, 전자파를 방출시키는 활성화된 매질이 있어야 하며, 이것은 보통 원자 혹은 분자들의 집합체로 이루어져 있다. 둘째는, 활성화된 매질 내에서 반전분포현상이 있어야 하며, 이것은 광학적인 펌핑 등 여기과정에 의해 이루어진다. 셋째로는 레이저 기구 내에 광학적인 증폭기구가 있어야 하며, 이것은 레이저 공진기의 반사미러 등에 의해 이루어진다.

보어(Bohr)는 원자의 전자가 핵 주위의 궤도에서 원운동을 하고 있

으며, 각 궤도를 넘나들 때 광이 매개가 된다는 것을 밝혔다. 즉, 높은 에너지 준위에 있는 전자는 낮은 에너지 준위인 기저상태로 천이되면서 그 에너지 차이에 해당하는  $h\nu$ 의 광자(photon)를 스스로 방출하게 된다. 이것을 자연방출이라고 한다. Fig. 2.3은 광의 유도 흡수, 자연방출, 유도방출의 원리를 설명하고 있다.  $E_2$ 의 상태에 있는 원자가  $E_1$ 의 상태로 떨어지면서 그 에너지 차이에 해당하는 광을 방출한다. 한편 이는 역의 과정도 가능하다.  $E_1$ 의 상태에서 광을 흡수하여 여기상태인  $E_2$ 상태가 된다. 이것을 광의 흡수라고 한다. 이때는 역시 그 에너지 차이에 정확하게 일치하는 에너지의 광이 입사해야 한다. 이것이 물질과 광 사이에 일어나는 상호작용의 기본적인 것이다.

아인슈타인은 보어의 가설에서의 광과 원자와의 상호작용 두 가지, 즉 유도흡수, 자연방출에 유도방출 이라는 새로운 개념을 도입함으로써 레이저의 중요한 기초원리를 밝혔다. 즉, Fig. 2.4에 나타낸 것과 같이 유도흡수에 의해  $E_1$ 에서  $E_2$ 로 여기된 전자에  $h\nu$ 의 에너지를 가진 광이 입사하면 동일 주파수의 광을 방출하고  $E_1$ 준위로 천이한다. 이때 방출된 광의 위상과 방향이 입사광과 동일하다. 광이 매질을 지나는 동안 유도흡수에 의해 사라지기도 하고 유도 방출에 의해 증폭되기도 하지만 여기된 상태의 원자수가 많다면 결과적으로 증폭된 광이 만들어진다. 이것이 유도방출이란 현상으로 광의 증폭을 가능하게 한다.

보통의 광원이 내는 광은 광원의 무수히 많은 원자가 제멋대로 광을 방출한다면 서로 결이 맞아 있지 못하다. 따라서 Fig. 2.5의 (a)와 같이 N개의 이러한 광이 더해지면 단순히 N배의 밝은 광이 된다. 반면 광원의 무수히 많은 원자가 만일 동시에 결 맞은 상태의 광을 낸다면 (b)의 그림처럼 진폭이 N배가 되어서 밝기는  $N^2$ 에 비례하여 증가한다.

유도방출의 증첩 광을 내는 각 원자들이 다른 원자가 내는 광의 자극을 받아 광을 방출하므로 각 광들이 결맞아 있어서 특정한 방향으로 보강간섭을 하여 매우 강력한 광이 될 수 있다.

한편, 열적 평형상태에서는 낮은 상태에 많은 원자들이 존재다. 많은 원자가 모여 있는 기체, 고체, 액체 등의 물질은 그것을 구성하는 개개 원자의 일부분은 높은 에너지 상태(여기상태)에 있지만 거의 대부분은 여전히 기저상태에 있다. 온도가 올라가면 여기상태의 원자가 점차 많아지기는 하지만 여전히 기저상태에 있는 원자의 개수는 많다. 이러한 상태를 볼츠만 분포(Boltzman distribution)라고 한다. 극단적으로 무한대의 온도가 된다면 비로소 모든 에너지 준위에 있을 가능성이 같아진다. 한편 음수의 온도가 있을 수 있다면 역전이 가능하기는 하지만 열적인 평형상태에서는 이러한 일이 벌어질 수 없다. 유도방출을 위해서는 이 상태를 역전시켜 반전분포의 상태, 즉 기저상태의 원자보다 여기상태의 원자수가 많은 분포로 만들어야 한다. 이 반전분포를 실현시키기 위해서는 외부에서 에너지를 가하여 여기상태의 원자를 증가시켜야 한다.

한편 유도방출이 우세할 조건에 이르게 되더라도 모든 원자가 일거에 방출되지는 못한다. 이는 한 원자가 유도방출이든 자연방출이든 방출하는 광이 다른 원자를 자극시킬 확률이 그렇게 크지 못하기 때문이다. 따라서 그러한 기회를 크게 가질 수 있게 Fig. 2.6에서 보는 것처럼 레이저 매질이 들어있는 관의 양단에 미러를 평행으로 배치하여 그 미러 사이에 광이 무수히 반사되면서 거의 모든 원자들을 유도방출에 가세시키게 한다. 관속에서 운동하는 광은 그 미러 내부에서 공명상태로 존재할 수 있어 이를 레이저 공진기라고 한다. 거울의 효과로 관

이 겹쳐 길어진 것과 같기 때문에 그 관을 따라 나란하게 진행되는 광은 계속 가세하는 유도방출의 광에 의해 점점 더 강한 광이 된다. 광의 세기가 커지면 그곳에 있는 매질을 더 많이 자극시키기 때문에 여기된 매질이 충분히 공급되기만 한다면 광은 기하급수적으로 증폭될 것이다.

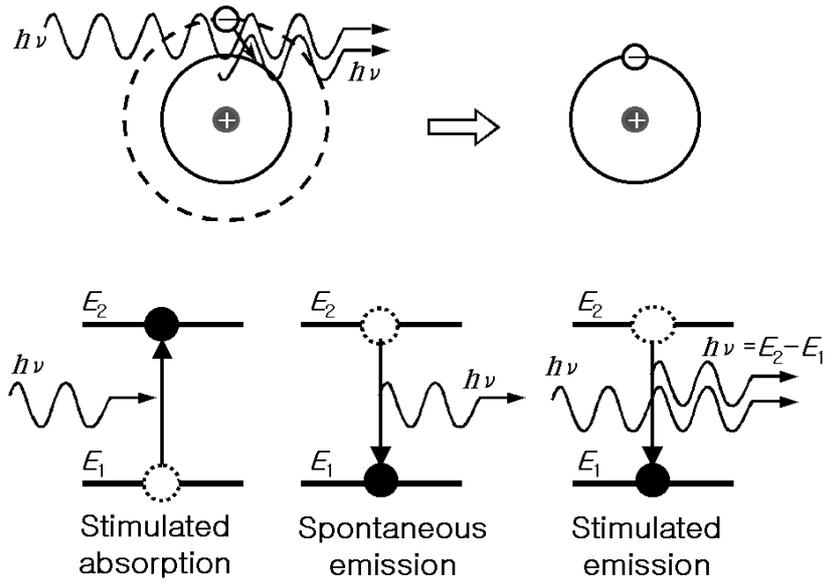


Fig. 2.3 Absorption and emission of light

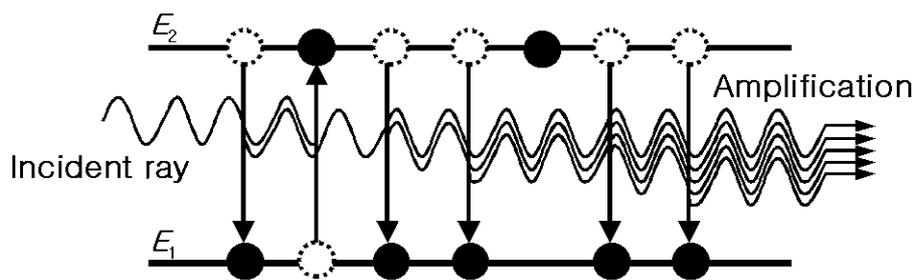
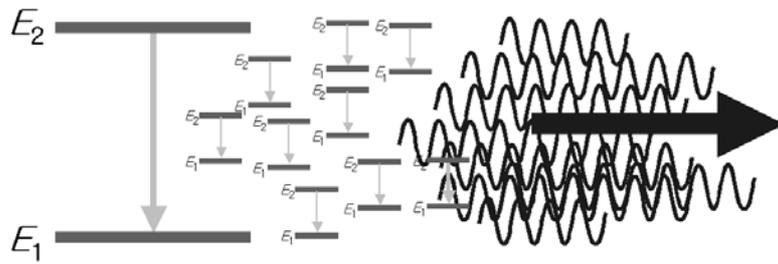
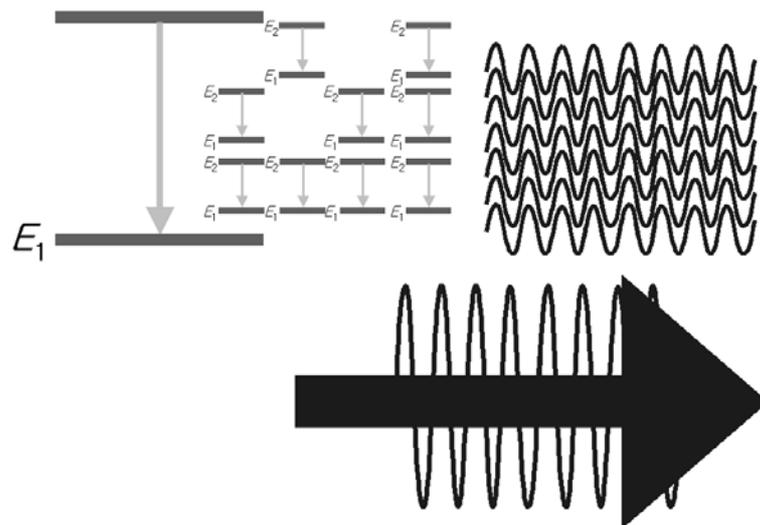


Fig. 2.4 Amplification of light by stimulated emission



(a) Spontaneous emission



(a) Stimulated emission

Fig. 2.5 Emission of light

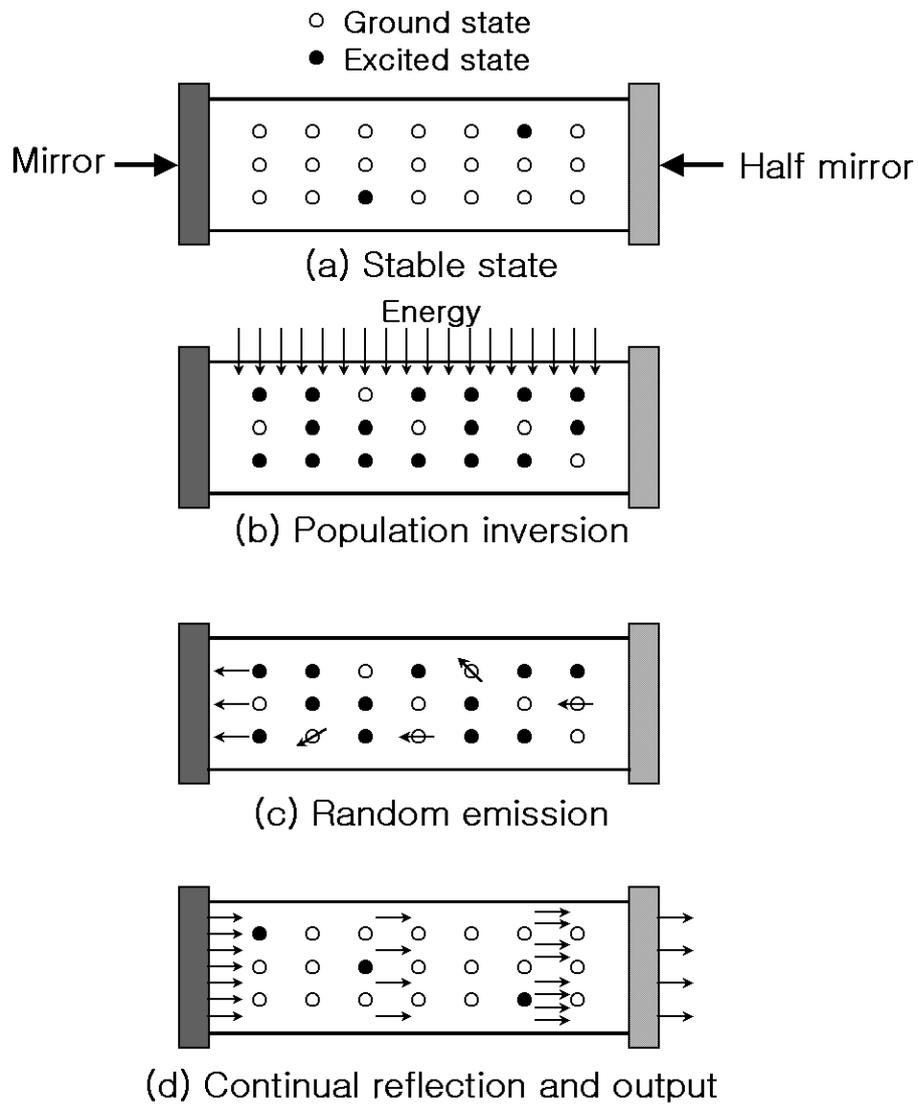


Fig. 2.6 Amplification of light by continual reflection

## 2.2.2 산업용 레이저의 특성

### (1) 산업용 레이저의 종류

레이저는 능동 매질에 따라 고체 레이저, 액체 레이저, 기체 레이저로 구분할 수 있다. 이 능동 매질에 따라서 레이저의 발진 방식이 다르며, 각각의 발진 파장에 따라 빔 특성도 달라지게 된다. 현재 사용하고 있는 용접용 레이저로서는 기체 레이저인 CO<sub>2</sub>레이저와 고체 레이저인 Nd:YAG레이저가 대표적이다. 이 두 레이저 장치를 Fig. 2.7 와 Fig. 2.8 에 나타낸다.

CO<sub>2</sub>레이저는 대출력화가 용이하며, 발진효율도 높기 때문에 비교적 후판재의 고속도 연속용접에 사용된다. 그러나 빔 전송에 광 화이버가 이용되지 않고, 다수의 반사미러를 사용하기 때문에 빔 전송광학계가 복잡하고, 적외역의 광학부품이 고가이며, 금속의 반사손실이 크고, 플라즈마의 영향을 받기 쉬운 등의 해결해야 할 기술과제가 많다.

반면 Nd:YAG레이저는 평균 파워가 낮으므로 박판과 소형부품의 용접을 중심으로 사용된다. 광 화이버에 의한 빔 전송이 가능한 것이 큰 장점이며, 3차원 용접 등의 복잡한 시스템은 CO<sub>2</sub>레이저에 비하여 설비의 간략화가 가능하다. 또한 직경 수 mm정도의 간극이 있어도 레이저 에너지의 전송이 가능하여 좁은 공간과 위험한 장소에서의 용접도 가능하다.

이것 이외에도 루비레이저, 엑시머레이저, 반도체레이저 등도 용접이 가능하지만 공업적인 중요성은 낮다고 하겠다.

### (2) CO<sub>2</sub>레이저의 특성

CO<sub>2</sub>레이저는 원적외선 구역인 10.6 $\mu$ m파장의 고출력 펄스 또는 연속

파를 방출시킬 수 있으며, 약 15%이상의 높은 효율을 주기 때문에 Nd:YAG레이저와 함께 재료가공에서 가장 많이 사용되는 레이저이다. CO<sub>2</sub>레이저는 원자기체 또는 이온기체들의 전자적인 에너지 준위들 사이의 전이에 의하지 않고, 레이저의 능동매질인 CO<sub>2</sub>분자들의 진동 및 회전준위들 사이의 전이에 의한 분자기체 레이저이다.

CO<sub>2</sub> 레이저 발진기의 구성은 Fig. 2.9에 나타난 것과 같이 3가지 방식이 있다. (a)는 동축형으로서 가스의 흐름방향, 방전방향(전극의 배치), 발진 방향(공진기 미러의 배치)이 일치하는 형태로 싱글모드의 빔을 얻기 쉬우며 출력은 2kW 이하 정도이다. 직교형은 앞에서 설명한 3방향중 2축이 직교하는 2축 직교형, 3축 모두 직교하는 3축 직교형으로 나누어진다. (b)는 가스흐름 방향과 방전방향이 일치하고, 발진방향이 각각 교차하는 2축 직교형이고, (c)는 세 방향이 서로 직교하는 3축 직교형이다. 2축과 3축 직교형 모두 멀티모드(multi mode)이지만 대출력을 얻기 쉬우며, 1kW이상의 높은 파워의 레이저로서 이용되는 경우가 많다.

CO<sub>2</sub>레이저는 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He의 3 분자를 혼합가스로 사용하는데, 유도 방출에 의하여 광을 내는 분자는 CO<sub>2</sub>이며, N<sub>2</sub>는 CO<sub>2</sub>를 상위 준위로 선택적으로 여기시키는 기능을 하고, He은 CO<sub>2</sub>분자의 천이를 촉진시켜 발진효율과 출력을 증가시키는 기능을 한다.

한 개의 탄소원자와 두 개의 산소원자로 구성된 CO<sub>2</sub>분자는 가장 낮은 전자에너지 준위상태에서 Fig. 2.10과 같이 대칭(Symmetric stretching), 비대칭(Asymmetric stretching)과 굽힘(Bending)운동의 세 가지 다른 형태의 진동운동을 한다. 어떤 준위에서 CO<sub>2</sub>분자는 이 세 가지 진동모드의 일차적인 조합으로 진동하며 ( $n_1, n_2, n_3$ )로 나타낸다.

여기서  $n$ 으로 나타낸 숫자는  $\text{CO}_2$ 분자의 각 진동모드에 관련된 에너지 양자의 수를 나타낸다. 즉,  $n_1$ 은 대칭형 진동의 주파수  $\nu_1$ 의 양자수,  $n_2$ 는 굽힘형 진동의 주파수  $\nu_2$ 의 양자수,  $n_3$ 는 비대칭형 진동의 주파수  $\nu_3$ 의 양자수이며, 이들 각 진동의 주파수는 각각  $4 \times 10^{13}\text{Hz}$ ,  $2 \times 10^{13}\text{Hz}$  및  $7 \times 10^{13}\text{Hz}$ 이다.

$\text{CO}_2$ 레이저에서 레이저빔이 방출되는 전이과정은 Fig. 2.11과 같다. 고전압에 의하여 가스방전이 되면  $\text{CO}_2$ 분자들은 기저준위로부터 펌핑되어 전자에너지 준위가 큰 상태로 여기된 후, 다시 준 안정준위로서 레이저 상부준위의 역할을 하는 (001)준위로 떨어지게 된다. 만일 충분한 펌핑이 있으면, (001)준위와 (100)준위 사이에 반전분포가 일어나 적외선인  $10.6\mu\text{m}$ 의 레이저를 방출시키며, 또한(001)준위와 (020)준위 사이에도 반전분포가 발생하여  $9.6\mu\text{m}$ 의 레이저를 방출시킨다.

$\text{CO}_2$ 레이저에서는 레이저의 전반적인 출력과 효율을 증가시키기 위하여 능동매질인  $\text{CO}_2$ 이외에 비슷한 용적의  $\text{N}_2$ 와 수배의  $\text{He}$ 가스를 첨가시키며, 그 전체압력은 약 20 torr 내외 정도이다.  $\text{N}_2$ 가스는 Fig. 2.11에 보는바와 같이 방전관내에서 전자와 충돌하여 높은 에너지 준위인  $v=1$ 로 여기된다. 그 후에 여기된  $\text{N}_2$ 가스가  $\text{CO}_2$ 분자와 충돌하여  $\text{N}_2$ 가 지닌 에너지를  $\text{CO}_2$ 로 전달시킴으로서  $\text{CO}_2$ 분자를 여기상태의 준위로 전이시킨다. 이 여기된  $v=1$ 에너지 준위의  $\text{N}_2$ 원자는 긴 수명을 가지고 있으며,  $\text{N}_2$ 와  $\text{CO}_2$ 의 여기된 에너지 준위들 사이의 에너지는 거의 비슷하므로 이러한 충돌과정은 에너지 전달에 매우 효율적이다.

그리고  $\text{He}$ 원자는 레이저 하부준위인 (100)에 있는  $\text{CO}_2$ 분자와 충돌하여 기저준위로 빠른 전이가 일어나도록 한다. 에너지를 얻은  $\text{He}$ 원자는 레이저관의 내벽에 충돌하여 열에너지 형태로 외부로 방출한다. 이

때 방전관을 냉각하게 되면 He원자의 순환이 원활해져서 레이저의 발진효율을 증가시킨다.

### (3) Nd:YAG레이저의 특성

ND:YAG레이저는 레이저 매질로서 YAG(Yttrium Aluminum Garnet :  $Y_3Al_5O_{12}$ )에  $Nd^{+3}$ 활성이온을 약 0.5%정도로 도핑(doping)한 단결정을 레이저 매질로 하여 광여기를 통해 레이저가 발진된다. Nd가 결정격자에서 치환되어  $Nd^{+3}$ 이온 상태로 존재하게 되면 여러개의 낮은 에너지 준위 가지게 된다. Fig. 2.12는 YAG레이저의 에너지 준위를 나타낸다. ND:YAG레이저는 4준위 기구이며 근적외선 구역의 파장인  $1.06\mu m$  파장의 레이저를 방출시킨다. 연속파 또는 펄스 등의 여러 가지 모드로 동작이 가능하며, 광 화이버 전송이 가능한 점, 반사율이 적어서 고 반사 재료의 가공에 유리한 점, 장치가 소형인 점 등의 장점 때문에 공업적으로 가장 많이 사용되는 레이저 중의 하나이다.

YAG레이저의 여기 과정은 Fig. 2.12에서 설명할 수 있다. 먼저 크세논(Xe) 또는 아크(arc) 램프 등의 광원을 이용하여 광학적으로 YAG로드를 여기시키면  $Nd^{+3}$ 이온들은 기저준위( $^4I_{9/2}$ )로부터 레이저 상부준위( $^4F_{3/2}$ )이상의 준위대로 여기된다. 이들 준위대로 여기된 이온들은 곧 광자를 방출시키지 않는 비복사성 전이에 의해 상부준위 ( $^4F_{3/2}$ )로 떨어지게 된다. 이 준위는 지속시간이 약  $2.5 \times 10^{-4}$ 초 정도인 준 안정준위로서 레이저 방출에서 상부준위의 역할을 한다. 레이저를 방출시키는 전이는 주로 ( $^4F_{3/2}$ )준위와 ( $^4I_{11/2}$ )준위 사이에서 얻어지며, 그 방출되는 레이저는  $1.06\mu m$ 의 파장을 가진 광이 방출된다. 이 이외에도 ( $^4F_{3/2}$ )준위와 ( $^4I_{13/2}$ )준위 사이에서  $1.32\mu m$ 와 ( $^4F_{3/2}$ )준위와 ( $^4I_{9/2}$ )준위 사이에서  $0.94\mu m$

의 파장을 가진 광들이 방출되지만,  $1.06\mu\text{m}$ 의 성분에 비하여 적다. 그리고 레이저 전이의 하부준위인 ( ${}^4I_{11/2}$ )준위는 기저준위 ( ${}^4I_{9/2}$ )보다 위에 있으며, 정상적인 레이저 동작온도에서 그 분포밀도는 무시될 정도이다. 결국  $1.06\mu\text{m}$ 의 방출된 광은 공진기의 양단에 위치한 반사거울을 통하여 증폭되어 레이저가 발진되는 것이다.

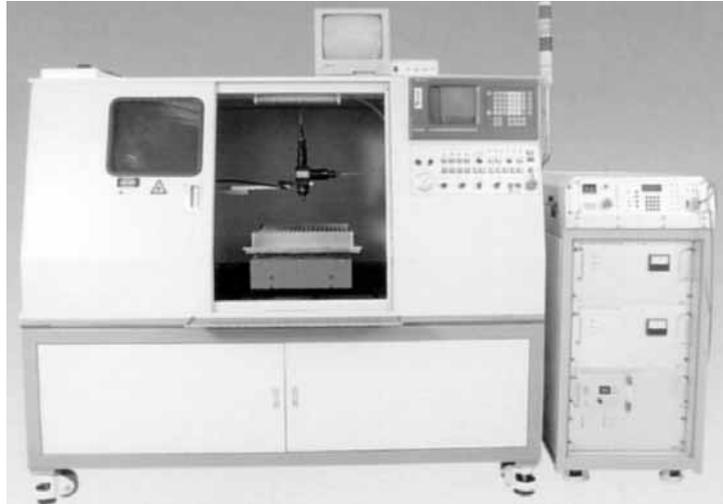


(a) CO<sub>2</sub> laser equipment



(b) Condensing head

Fig. 2.7 CO<sub>2</sub> laser equipment and condensing head

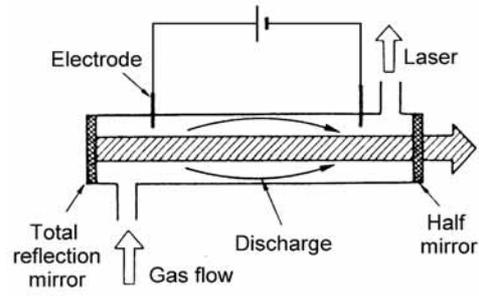


(a) YAG laser equipment

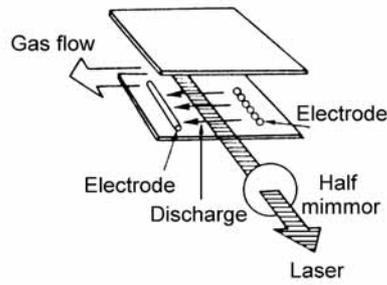


(b) Application of YAG laser

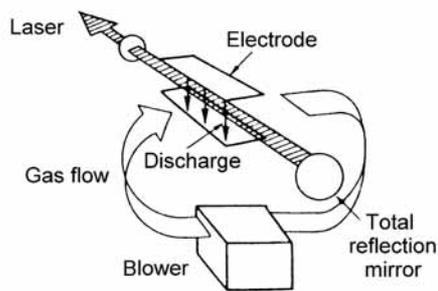
Fig. 2.8 YAG laser equipment and application



(a) Axis flow laser



(b) 2 axis transverse flow laser



(c) 3 axis transverse flow laser

Fig. 2.9 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> laser generator

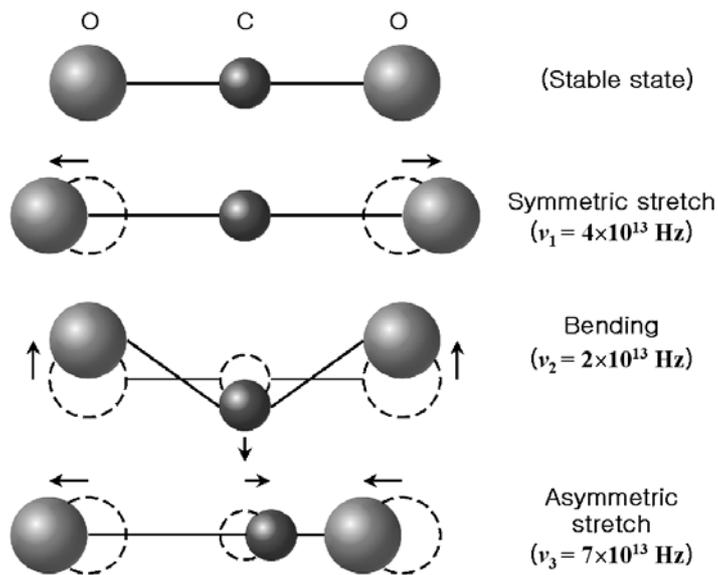


Fig. 2.10 States of CO<sub>2</sub> molecular

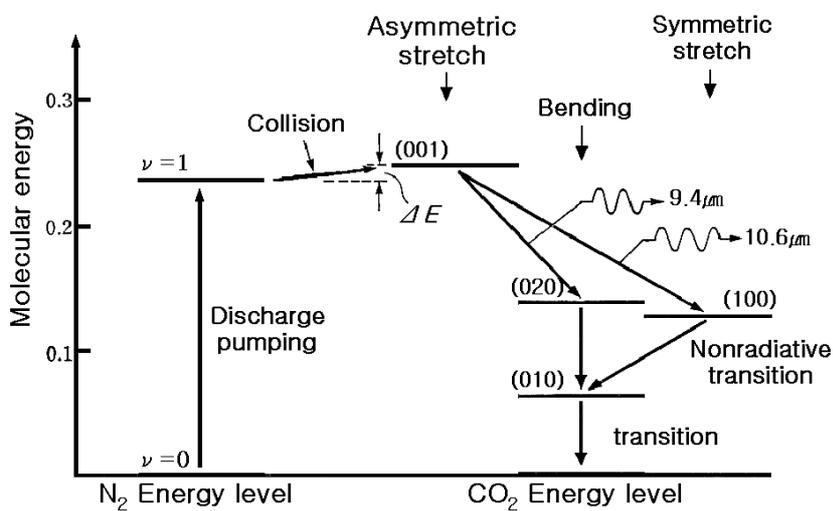


Fig. 2.11 CO<sub>2</sub> laser energy level and laser transition

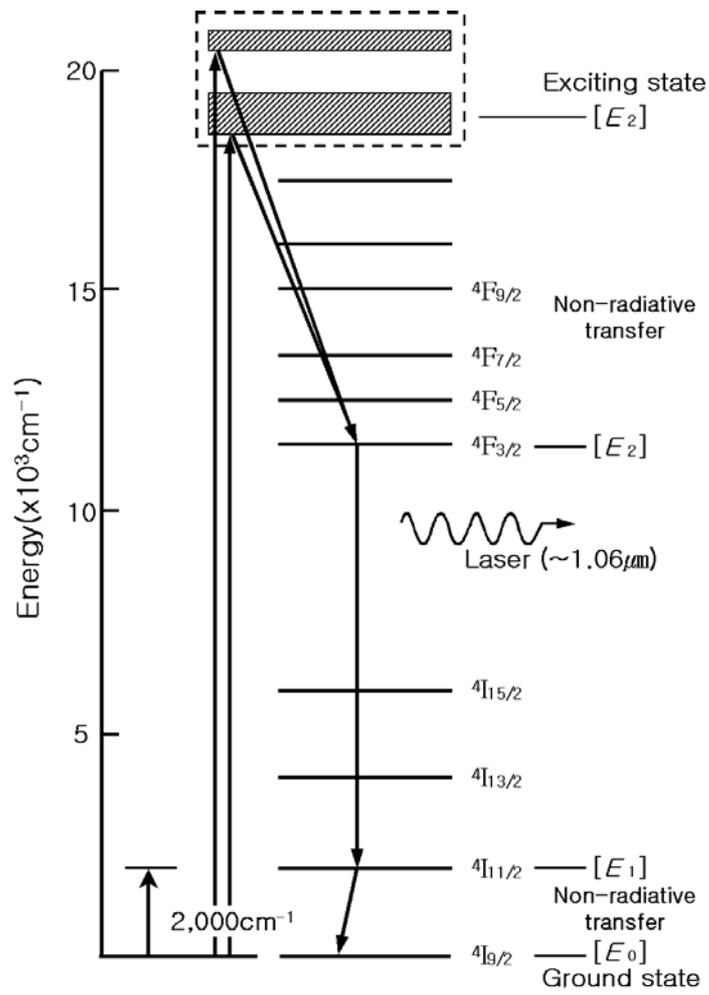


Fig. 2.12 YAG laser energy level and laser transition

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험재료와 CO<sub>2</sub> 레이저 용접법

##### 3.1.1 실험재료

본 연구에서 사용된 레이저 용접용 재료는 Zn-riched primer가 코팅된 조선용 구조용강 AH36으로 두께는 6mm<sup>t</sup>이며 그 화학적 조성을 Table 3.1에 나타낸다.

실험용 시험편은 15 $\mu$ m와 30 $\mu$ m의 primer가 코팅된 강판과 코팅막을 제거한 비코팅 강판의 3종류를 사용하였다. 레이저 용접성에 미치는 primer코팅조건에 영향을 비교·검토하기 위하여 Bead welding, Butt welding 및 Lap welding법을 적용하고, 시험편의 primer성분을 제거하거나 표면 및 Lap부위의 코팅두께를 다양하게 변화시켰다. Table 3.2에 AH36의 주된 원소인 Fe성분과 primer코팅층의 주요 성분인 Zn에 대한 물리적 성질을 비교하여 나타내었다. Zn의 비점(boiling point)이 Fe의 용점(melting point)보다 낮은 것을 알 수 있는데, 이러한 물성적 차이로 인하여 스파터나 기공이 용이하게 생성될 것으로 생각된다.

Table 3.1 Chemical compositions of primer-coated steels

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

Table 3.2 Physical constant of Fe and Zn

physical constant Element	Density (kg/m <sup>2</sup> )	<b>Melting point (K)</b>	<b>Boiling point (K)</b>	Thermal conductivity J/(m · K)[473 K]	Reflectivity (%) R[1.06μm]
Fe	7,870	<b>1,808</b>	<b>3,027</b>	61.74	65
Zn	7,130	<b>692</b>	<b>1,176</b>	105	49

### 3.1.2 CO<sub>2</sub> 레이저 용접장치와 용접방법

본 연구에서 사용된 레이저 용접열원은, 최대출력 6kW의 RF 여기방식 고속 축류형(fast axial flow) CO<sub>2</sub> 레이저이다. Fig. 3.1은 CO<sub>2</sub> 레이저 장치의 개략도를 나타내고 Fig. 3.2는 본 장치에 사용되고 있는 동축 실드가스 노즐의 개략도를 나타낸다. 본 장치의 주요 사양을 Table. 3에 정리하여 나타내었다.

CO<sub>2</sub> 레이저 장치의 Beam mode는 TEM<sub>01</sub>이며, 출력 증가시 안정된 출력범위인 ±2% 이내로 유지되는데 5~10분이 소요된다. 빔의 확산각은 1.5mrad 미만이다. 용접장치는 5축 캔틸레버(외팔보)방식으로 X 및 Y축의 최대 이동속도는 50m/min, Z축은 최대 30m/min, 그리고 Y축 및 Z축에 대한 회전각속도는 360°/s 이다. 또한 집광광학계의 초점길이( $f$ )는 270mm이며 동축 실드가스 노즐(coaxial shield gas nozzle)을 사용하여 15 ℓ/min의 He으로 용접부를 실드하였다. 그리고 본 장치에는 용접부에서 비산하는 스패터로부터 광학계를 보호하기 위하여 cutting air를 적용하고 있다.

Fig. 3.3은 CO<sub>2</sub> 레이저 장치와 본 연구를 위하여 별도로 제작한 용접지그의 실례를 보이고 있다. Primer코팅강판 AH36의 Lap welding시 용접성에 미치는 Gap간극의 영향을 조사하기 위하여 시험편을 고정하고 레이저 용접을 행하고 있는 모습을 나타낸다. Fig. 3.4는 Gap간극의 영향을 조사하기 위한 실험의 모식도를 각각 보여주고 있다. 용접지그 위에 하부 시험편을 놓고, 그 위에 상부와 하부 시험편 사이의 일정한 Gap간극을 주기 위해 distance sheet재로서 STS 304박판(0.05~0.35mm<sup>1</sup>)을 설치한 후 상부의 시험편을 높고 고정하였다. 용접변형에 의한 Gap간극의 변화를 없애기 위해 볼트를 사용하여 동일한 힘으로

지그에 고정하였다. 피용접 시험편의 크기는  $50\text{mm} \times 150\text{mm} \times 6\text{mm}^t$ 로 하여 Bead welding을 비롯한 Butt welding 및 Lap welding에도 동일하게 적용하였으며, 용접 전 시험편의 표면은 아세톤으로 탈지하였다.

단면관찰용 시험편은 Fig. 3.5에 보인바와 같이, 재현성을 확보하기 위하여 비드가 안정적으로 얻어지는 레이저빔 조사 후 30mm진행된 시점에서 횡단면(transverse section) ㉠, 그리고 연속하여 용접진행방향으로 18mm의 종단면(longitudinal section)㉡를 각각 채취하였다.

본 실험에서 사용한 주요 용접조건을 Table 3.3에 나타내었다. 레이저 출력( $P$ )은 최대 정격 출력인 6kW를 사용하고, 출사집광계의 집광미러는 초점길이( $f$ ) 270mm를 이용하였다.

비드의 천이영역(transition ranges)을 조사하기 위해 비초점거리( $f_d$ )에 따른 용입깊이를 정의한 후 용접속도( $v$ )를 각 용접법에 따라 다양하게 적용함으로써 용입현상과 결함발생 경향에 대한 기초자료를 확보하였다.

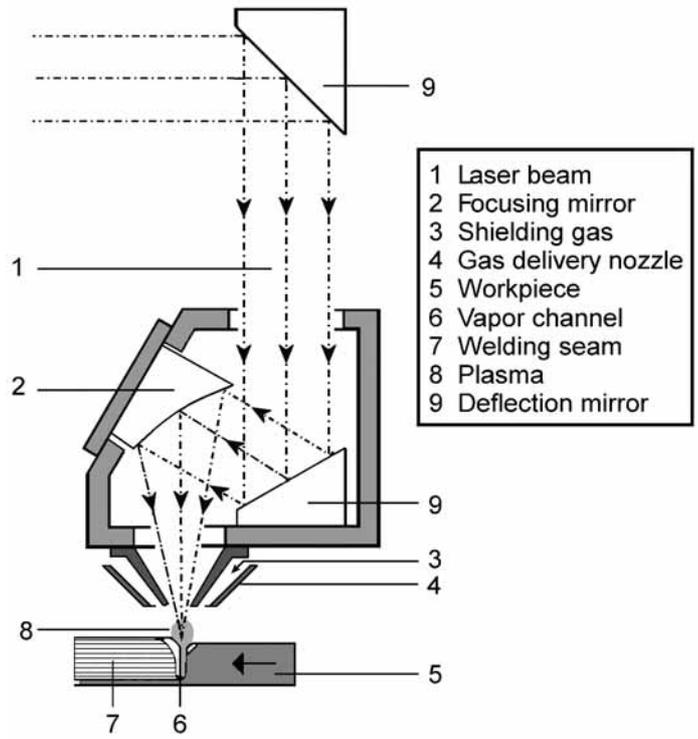


Fig. 3.1 Schematic illustration of CO<sub>2</sub> laser

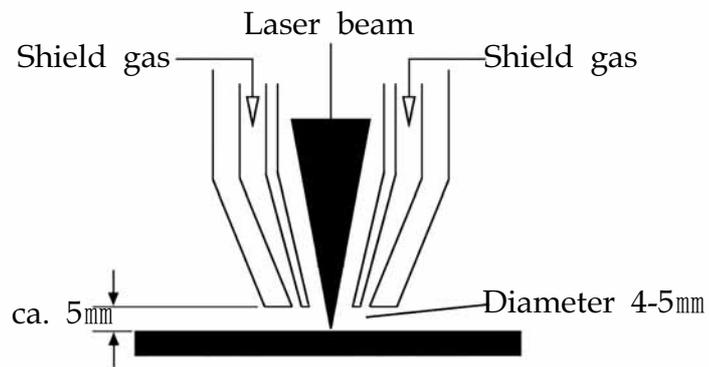


Fig. 3.2 Schematic illustration of Coaxial shield gas nozzle

Table 3.3 Specification of CO<sub>2</sub> laser

System	Specification		Remarks
Laser	Type Power Frequency Beam mode Output stability Divergency angle	fast axial flow <b>300~6,000W</b> 100Hz~100kHz <b>TEM<sub>01</sub></b> ±2% <1.5 mrad	TLF 6000 turbo
Welding M/C	Type Working range Speed Accuracy Welding head Cutting head Surface treatment head Twin focusing mirror Filler wire feeder	5 axis Cantilever type M/C 3,000x1,500x500mm <sup>3</sup> X,Y=50m/min, Z=30m/min B,C=360°/s positioning accuracy ±0.1mm repeatability ±0.03mm <b>200, 270mm focal length</b> 5", 7.5" focal length 200mm focal length,10x10mm <sup>2</sup> 0.7mm spot distance 10m/min, 0.9~1.6mm Φ	TLC 1005
Others	Monitoring system	plasma, temperature	LWM900

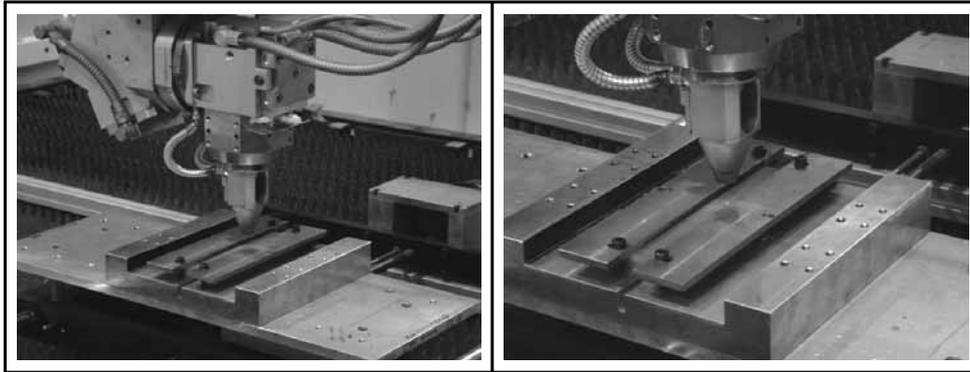


Fig. 3.3 Photos of CO<sub>2</sub> laser welding

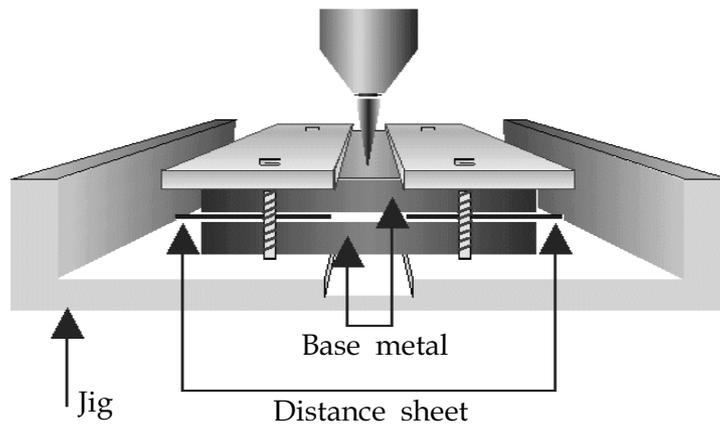


Fig. 3.4 Weld jig

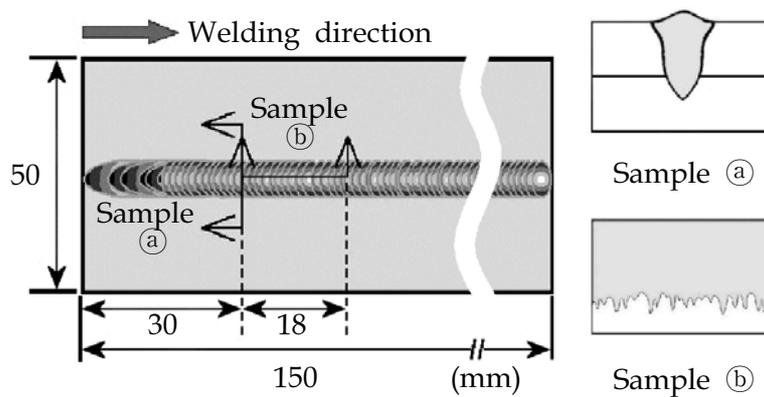


Fig. 3.5 Sampling of specimen

Table 3.4 Ranges and main values of welding parameters

Welding parameters	Ranges	Main values
Laser power, $P(\text{kW})$	3~6	6
Welding speed, $v(\text{m}/\text{min})$	0.8~3.5	0.8, 1.0, 1.5
Focal length of condensing optic mirror, $f(\text{mm})$	270	270
Defocused distance, $f_d(\text{mm})$	-8~+14	-2
Primer coated thickness, $t_{\text{pr}}(\mu\text{m})$	15, 30	15, 30
Gap clearance, $G_c(\text{mm})$	0~0.3	0.08, 0.1, 0.15,
Flow rate of shield gas He, $Q(\ell / \text{min})$	6~24	0.2
		15

## 3.2 용접금속부의 기공과 증발입자의 조성 분석방법

### 3.3.1 용접금속내 기공의 조성 분석방법

Primer 코팅강판의 레이저 용접시 용접금속 내에 발생하는 기공의 조성을 분석하기 위하여 기공의 발생이 용이한 Lap welding 조건에서 얻어진 용접 금속부를 강제 파단하여, 노출된 기공과 조직의 조성을 분석하였다. 강제 파단된 단면과 기공의 내벽은 광학 현미경 및 SEM을 이용하여 관찰하였고, 각 부위의 조성은 EDX 및 XRD를 통하여 분석하였다.

### 3.3.2 증발입자의 포집 및 조성 분석방법

Primer 코팅강판의 Lap welding시 Gap간극을 변화시킴에 따라 시험편 표면으로 증발하는 primer의 거동에도 많은 차이가 있을 것으로 사려된다. 따라서 조건별 용접 중에 증발하는 입자를 채취하여 성분비를 비교·분석하였다. Fig. 3.6은 용융지로부터 분출되는 증발원소를 포집하기 위한 실험의 모식도를 나타낸다.

증발원소 포집용 기관으로서 모재 및 primer의 조성과는 다른 알루미늄 합금판 A6061을 사용하였으며, 포집시 용융지로부터 증발하는 위치에 맞추어 기관을 Jig상에 고정하였다. 기관상의 포집량을 분석에 필요한 양만큼 안정적으로 확보하기 위해 동일한 레이저의 조사조건에서 4회 왕복 용접하였다.

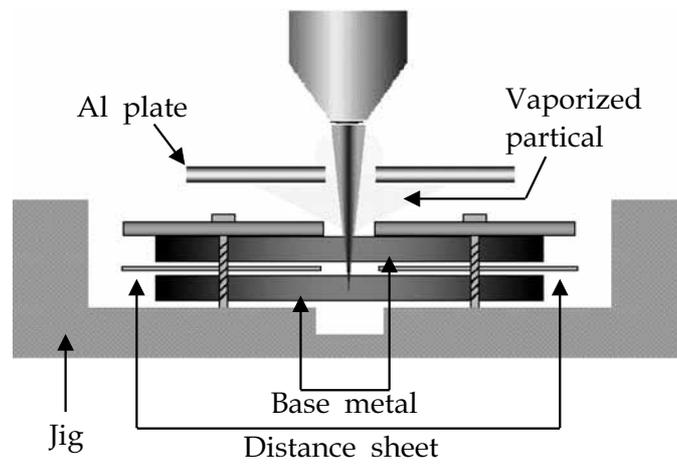


Fig. 3.6 Schematic illustration of setup to sampling vaporized-particle

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 Primer코팅강판의 용입 및 용접결합의 특성

본 실험은, primer코팅강판의 레이저 용접에 있어서 primer의 증발에 의해 야기될 수 있는 용입특성과 기공결합 등의 양상을 파악하기 위한 기초실험으로서, 키홀과 기공의 형성 및 스파터의 발생 메카니즘 규명을 위한 기초적 지견을 얻는데 그 목적이 있다.

레이저 용접을 행함에 있어서 집광빔에 의한 재료의 용입특성을 검토하기 위하여 재료의 형상 특성과 primer의 코팅조건에 영향을 받지 않는 조건에서 비초점거리를 변화시켜 실험을 행하였다. 그 다음 bead welding, lap welding 및 butt welding의 각 이음 형태에 대하여 용접 속도 및 primer 코팅조건에 따른 용접특성을 비교·검토하였다. 또한 lap welding의 경우에 있어서는 primer의 코팅 위치를 변화시켜 용접을 행하여 코팅위치에 따른 용접특성을 비교하였다. 이러한 실험에 근거하여 lap welding시 gap 간극 및 primer 코팅조건을 변화시켜 실험함으로써 primer코팅강판의 용접특성에 미치는 gap간극의 영향을 검토하였다.

#### 4.1.1 집광광학계의 비초점 거리변화에 따른 용입특성

##### (1) Bead welding(비드 용접)

집광빔에 의한 재료의 용입특성을 검토하기 위해 재료의 형상특성과 primer의 증발에 의한 영향을 받지 않는 bead welding조건에서 비코팅 강판을 선정하여 비초점 거리( $f_d$ )변화에 따른 용입깊이의 변화를 조사하였다. 이것은 사용레이저에 대한 집광광학계의 집광성능, 빔과 재료와의 상호관련성을 결정짓는 변수이기도 하다.

Fig 4.1에 bead welding시의 비초점거리에 따른 용입비드의 형상, 비드폭 및 용입깊이의 변화를 나타내며, Fig 4.2에는 그때 형성되는 용접 금속의 횡단면과 종단면, 그리고 전면비드(front bead)폭의 변화를 각각 나타낸다. 용접비드의 샘플채취는 빔 조사 후 20mm지난 위치에서 횡단면을 취하고, 이어서 종단면을 절취하여 용입특성을 서로 비교하였으며, 용접속도( $v$ )는 3mm/min으로 일정하게 하였다. 여기에서 용입깊이를 정의함에 있어서, 비드의 횡단면만으로는 재료내부의 스파이킹(spiking)현상 등에 기인하여 정확한 깊이산정이 곤란하므로, Fig 4.2와 같이 일정길이의 비드 종단면에서 측정한 평균값을 사용함으로써 깊이변화에 따른 오차범위를 최소화하였다.

Fig 4.1의 결과에서는 양(+)과 음(-)의 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용입깊이는 얕아지며 비드폭은 다소 넓어지는 경향을 보이고 있다. 특히, 용입깊이는 양(+)의 비초점거리보다는 음(-)의 값에서 상대적으로 보다 폭넓은 범위에서 깊게 나타나고 있다. 이것은 “비드의 천이(bead transition) 현상”으로 집광빔이 재료표면아래의 내부에 위치하고 있음으로 해서 용입이 깊어짐에 따라 레이저빔의 파워밀도, 즉 집광빔의 단위면적당의 에너지밀도가 재료내의 초점위치에 이르기까지 높아지는

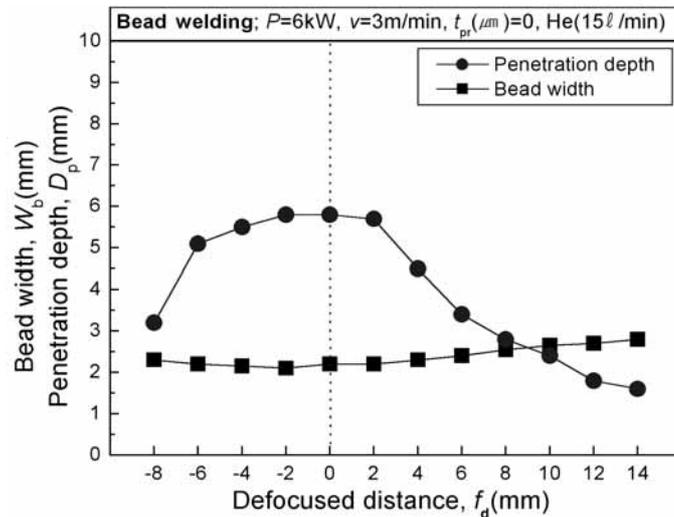
데 기인한다. 또한 비초점거리가 음인 위치에서는 레이저빔이 키홀 내벽에 다중반사 되어 재료 내부의 깊은 곳까지 전달되어 비초점거리가 양인 경우와 비교하여 에너지의 손실이 적어지기 때문이다.

Fig 4.2로부터 용입비드는 전반적으로 건전한 비드표면과 스파이킹 현상이 적은 안정된 비드를 형성하고 있음을 확인 할 수 있다. 즉, 비코팅 강판의 bead welding 조건에서는 primer코팅 및 이음 형상의 영향을 받지 않음으로 해서 용접결함의 발생은 매우 적다고 할 수 있다.

이와 같은 집광빔의 용융특성을 고려할 때, 본 실험에서는 용입깊이가 안정적으로 가장 깊게 나타나는 비초점거리  $f_d(\text{mm})=-2$  의 위치가 가장 적절한 것으로 판단된다.

Bead welding; $P=6kW$ , $v=3m/min$ , $t_{pr}(\mu m)=0$ , He(15 $\ell$ /min)					
Trans. section of bead					
$f_d$	0	+2	+4	+6	+8
Trans. section of bead					
$f_d$		-2	-4	-6	-8

(a) Shapes of Weld bead



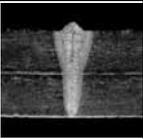
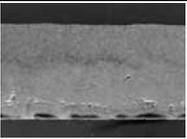
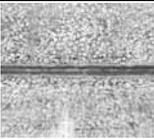
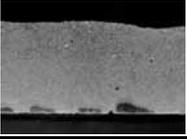
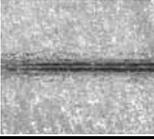
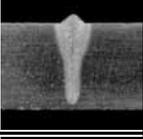
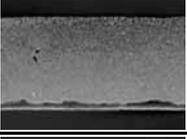
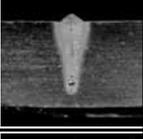
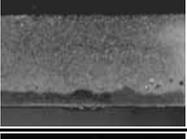
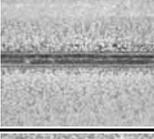
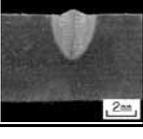
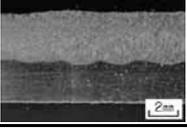
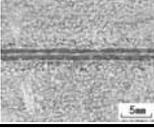
(b) Variation of penetration depth( $D_p$ ) and front bead with( $W_b$ )

Fig. 4.1 Variation of weld bead, penetration depth( $D_p$ ) and front bead with( $W_b$ ) as function of defocused distance in bead welding of primer-coated steel

Bead welding; $P=6\text{kW}$ , $v=3\text{m/min}$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=0$ , He( $15\ell/\text{min}$ )			
Weld bead $f_d(\text{mm})$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
+2			
+4			
+6			
+8			
+10			
+12			
+14			

(a)  $f_d=0\sim+14$

Fig. 4.2 Variation of transverse and longitudinal section of bead and front bead appearance as function of defocused distance in bead welding of primer-coated steel

Bead welding; $P=6\text{kW}$ , $v=3\text{m/min}$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=0$ , He( $15\ell/\text{min}$ )			
Weld bead $f_d(\text{mm})$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
-2			
-4			
-6			
-8	 <small>Zen</small>	 <small>Zen</small>	 <small>5mm</small>

(b)  $f_d=0\sim-8$

Fig. 4.2 To be continued

## (2) Lap welding(겹치기 용접)

Fig. 4.3에 lap welding시의 비초점거리 변화에 따른 비드의 형상, 용입깊이와 전면비드폭의 변화를 나타내고, Fig. 4.4에는 횡단면과 종단면, 그리고 비드폭의 변화를 각각 나타낸다.

Bead welding의 경우와 유사한 결과를 보이고 있으나 현저한 “비드의 천이현상”은 관찰되지 않고 있다.  $f_d = -2\text{mm}$ 의 위치에서 다소 깊은 용입을 보이고 있는 가운데 전반적으로 양(+)의 값보다 음(-)의 비초점거리에서 깊게 나타나며, 비드의 폭 또한 음(-)의 위치에서 미소한 차이긴 하지만 다소 넓게 나타나고 있음을 Fig. 4.3(a)의 비드형상과 (b)의 그래프로부터 확인할 수 있다.

Fig. 4.4의 비드 횡단면과 종단면의 비드 형상을 비교하여 보면, 비초점거리  $f_d$ 가 커짐에 따라 용입깊이가 얕아지면서 양(+)의 비초점거리 위치에서는 humping bead가 심해지는 반면 음(-)의 위치에서는 일정한 범위 내에서 보다 안정된 비드형상을 관찰할 수 있음이 흥미롭다.

이러한 현상은, lap welding의 경우 양(+)의 비초점 위치로 벗어날수록 용입깊이는 lap의 위치로 점차 얕아지게 됨에 따라 lap부위로부터의 산화막 등 기공의 발생원을 제공받기 때문인 것으로 사려되며, primer비코팅 강판의 경우에도 다소 Gap을 두는 것이 유리한 것으로 보고되고 있다<sup>20~22</sup>. 이에 반하여 음(-)의 비초점거리 영역에서는 빔의 집광특성상 Fig. 4.4(b)의 비드횡단면형상에서 볼 수 있듯이, 상대적으로 양(+)의 영역보다는 용입깊이도 깊고 비드폭도 넓은 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 보다 넓은 용융면적을 확보함으로써 기공이 부상하여 소실되는 결과라고 판단된다.

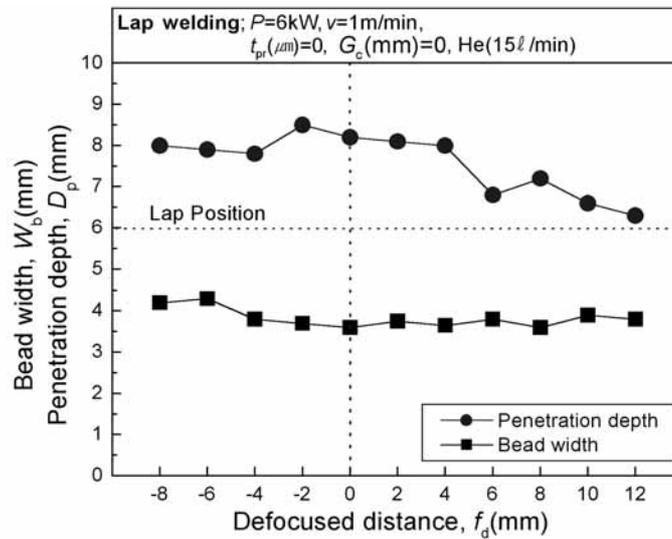
이러한 결과만을 볼 때, lap welding의 경우 광학계 및 실드가스 노

즐과 피용접재 시험편간의 거리가 허용되는 범위 내에서 음(-)의 비초점거리에서 실험을 행하는 것이 좋을 것으로 사려되지만, 그 간극이 수mm에 지나지 않으며 레이저빔이라는 고밀도 열원에 의한 합금원소의 폭발적 증발현상에 기인한 집광광학계 및 노즐 등 주변장치의 손상을 고려해 볼 때 가능한 한 과도한 음(-)의 위치는 피하는 것이 좋다. 또한 안정된 용입깊이를 확보하면서 속도제어 등 다른 용접인자를 우선 고려해 보는 방법이 좋을 것으로 판단된다.

이상의 bead 및 lap welding에서, 비초점거리  $f_d$ 에 따른 용입특성을 비교하여 볼 때  $f_d(\text{mm})=-2$ 의 위치가 비드의 안정성 및 건전성 확보측면에서 가장 유리한 것으로 판단되며, 이하의 실험에서는 집광광학계의 비초점거리  $f_d(\text{mm})$ 를 -2로 공히 적용하기로 한다.

Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $t_{pr}(\mu m)=0$ , $G_c(mm)=0$ , He( $15\ell/min$ )					
Trans. section of bead					
$f_d$	0	+2	+4	+6	+8
Trans. section of bead	X				
Trans. section of bead					
$f_d$		-2	-4	-6	-8

(a) Shapes of Weld bead



(b) Variation of penetration depth( $D_p$ ) and front bead with( $W_b$ )

Fig. 4.3 Variation of weld bead, penetration depth( $D_p$ ) and front bead with( $W_b$ ) as function of defocused distance in lap welding of primer-coated steel

Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $t_{pr}(\mu m)=0$ , $G_c(mm)=0$ , He(15 $\ell$ / min)			
Weld bead $f_d(mm)$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
+2			
+4			
+6			
+8			
+10			
+12			

(a)  $f_d=0 \sim +12$

Fig. 4.4 Variation of transverse and longitudinal section of bead and front bead appearance as function of defocused distance in lap welding of primer-coated steel

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=0$ , $G_c(\text{mm})=0$ , He( $15\text{ l / min}$ )			
Weld bead $f_d(\text{mm})$	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
-2			
-4			
-6			
-8			

(b)  $f_d=0 \sim -8$

Fig. 4.4 To be continued

#### 4.1.2 용접속도 및 primer코팅조건에 따른 용접특성

##### (1). Bead welding(비드용접)

Primer코팅강판의 레이저 용접성에 대한 기초적인 지견을 얻음과 동시에 최대 출력의 빔 조사조건에서 완전용입이 가능한 용접속도와 그때의 결함의 발생경향에 대하여 조사하였다. 또한, 비코팅 강판에 대해서도 비교·검토함으로써 기공결함 등의 형성거동에 미치는 primer의 영향에 대해서도 조사하였다.

Fig. 4.5는 bead welding에 있어서 용접속도와 primer코팅( $t_{pr}$ )에 따른 용접비드의 형상, 용입깊이( $D_p$ ) 및 전·후면 비드폭( $W_b$ )의 변화를 나타낸다. 또한 그때의 용접비드의 횡단면과 종단면, 그리고 전·후면 비드의 외관을 Fig. 4.6에 나타낸다. Fig. 4.5(a)에서 비드전면(S) 및 후면(B)의 코팅상황을 S(15)+B(15)로 나타내었으며 수치는 각각 코팅된 primer두께를  $\mu\text{m}$ 단위로 나타낸다. 또한, 집광광학계의 비초점거리  $f_d$ 는 전항 4.1.1에 근거하여 -2mm로 일정하게 하였다.

Fig. 4.5의 결과에서는 어느 조건에서도 용접속도( $v$ )가 증가함에 따라 용입깊이는 얕아지면서 비드폭 또한 감소하고 있으나, 용입깊이의 변화에 비하여 비드폭의 변화는 상대적으로 적은 편임을 알 수 있다. 안정된 완전용입을 얻기 위해서는 코팅조건에 따라 약간의 차이는 있으나 1.0m/min이하의 용접속도가 요구되고 있다. 1.5m/min의 용접속도에서는 외관상 완전용입이 되고 있으나 키흔하부에서 주로 발생하는 기공결함에 다량으로 노출되기 쉬우며, 그 이상의 용접속도에서는 코팅강판의 경우 완전용입이 이루어지지 않았다..

이러한 결과는, 시험편 표면의 primer코팅량이 증가함에 따라서도 용입깊이는 얕아지며, 비드폭은 넓어지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4.6 (a), (b) 및 (c)의 결과에서 완전용입이 일어나는 조건에서는 비드표면 및 횡·종단면 어느 쪽에서나 미려한 비드가 형성되고 있음을 알 수 있다. 그러나 각 조건에서 완전용입이 불완전하게 이루어지는 조건에서는 후면비드에 요철이 형성되며, 특히 (b)와 (c)의 코팅강판의 경우 각각 용접속도 2.0 및 1.5m/min부터 시험편 후면에 코팅된 primer가 용융금속으로 증발해 들어와 많은 기공이 형성됨을 알 수 있다.

비코팅강판의 경우, Fig. 4.7에서 보이는 바와 같이 완전용입이 일어나는 임계속도인 2.0m/min에서 불안정한 후면비드를 보이고 있으나 기공의 발생은 primer코팅강판의 경우에 비해 무시할 정도이다. 그러나 부분용입이 이루어지는 3.0m/min에서는 다량의 기공이 발생되고 있으며 이것은 키홀하부로부터 기공이 주로 생성되고 있음을 보여주는 좋은 예이다.

다음에는 완전용입에서 부분용입으로 변하는 입계용입조건에서의 기공발생상황을 매크로조직사진을 통하여 Fig. 4.8에 나타낸다. 용접속도는 2.0m/min이다. 비코팅강판에 비하여 코팅강판의 경우, 비드하부에 코팅되어 있는 primer의 증발에 의한 유입현상이 뚜렷하게 관찰되고 있다.

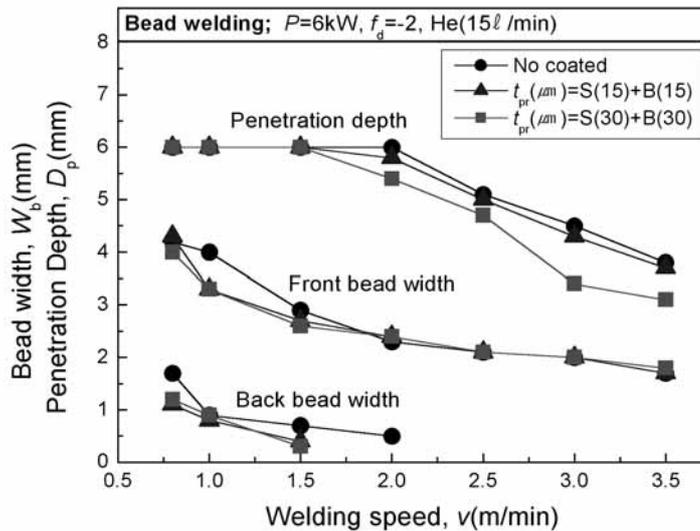
이상의 결과로부터, Bead welding조건시의 용접속도 및 primer코팅조건에 따른 용입면적비율과 기공의 발생면적비율을 Fig. 4.9 및 Fig. 4.10에 각각 정리하였다. 용접속도( $v$ )에 따른 용입면적( $D_{ar}$ )과 기공의 발생면적 비율( $P_{ar}$ )의 정의를 각 그림의 그래프 좌측상단에 도시하였다. 즉, 용입깊이는 일정길이의 비드종단면에 형성된 용입면적  $a$ 를 비드전체면적 $A$ 로 나누어 백분율로 나타내고, 기공발생면적 비율은 종단면상

의 실제 용입면적  $a$  내에 존재하는 기공단면의 면적  $P$ 를 백분율로 표시하였다.

용접속도에 따른 용입면적은 primer코팅두께( $t_{pr}$ )가 두꺼울수록 작아지며, 기공의 발생면적은 2.0m/min의 이하에서 primer코팅의 영향이 두드러지게 보인다. 그러나 2.5m/min이상의 부분용입조건에서는 오히려 비코팅 강판의 기공발생율이 높고 코팅강판의 경우가 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이것은 Fig. 4.5의 횡단면에서 볼 수 있듯이, 동일한 용접속도에서 primer코팅된 경우의 비드폭이 상대적으로 넓게 형성되어 용융금속 내에 형성된 기공의 부상이 용이하어 소실된 것으로 판단된다.

Bead welding; $P=6kW, f_d=-2, He(15\ell / min)$							
$v$ (m/min)	0.8	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$t_{pr}(\mu m)$							
No coated							
S(15)+B(15)							
S(30)+B(30)							

(a) Shapes of Weld bead



(b) Variation of penetration depth( $D_p$ ) and front/back bead width( $W_b$ )

Fig. 4.5 Variation of Weld bead, penetration depth( $D_p$ ) and bead width( $W_b$ ) as function of weld speed and primer-coated condition in bead welding

<b>Bead welding; <math>P=6kW</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>t_{pr}(\mu m)=0</math>, He(15 <math>\ell</math> / min)</b>				
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance	Front
				Back
0.8				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				

(a) No coated,  $t_{pr}(\mu m)=0$

Fig. 4.6 Variation of transverse/longitudinal section of bead and bead shape as function of weld speed and primer-coated condition in bead welding

Bead welding; $P=6kW$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=L(15)+B(15)$ , He(15 $\ell$ / min)				
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance	Front
				Back
0.8				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				

(b) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu m)=S(15)+B(15)$

Fig. 4.6 To be continued

Bead welding; $P=6\text{kW}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=L(30)+B(30)$ , He( $15\ell/\text{min}$ )				
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance	Front
				Back
0.8				
1.0				
1.5				
2.0				
2.5				
3.0				
3.5				

(c) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(30)+B(30)$

Fig. 4.6 To be continued

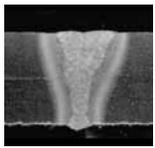
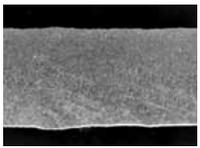
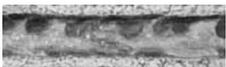
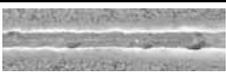
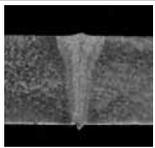
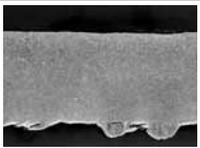
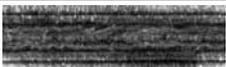
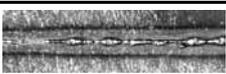
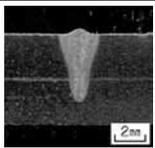
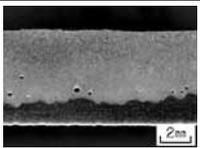
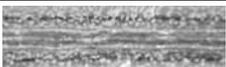
<b>Bead welding; <math>P=6kW</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>t_{pr}(\mu m)=0</math>, He(15 <math>\ell</math> /min)</b>				
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appar- ence	Front
				Back
0.8			 	
2.0			 	
3.0	 <small>2mm</small>	 <small>2mm</small>	 <small>5mm</small>	

Fig. 4.7 Formation of porosity by penetration depth in bead welding of no coated steel

Bead welding; $P=6kW$ , $v=2m/min$ , $f_d=-2$ , He( $15\ell/min$ )			
Weld bead $t_{pr}(\mu m)$	Trans./Longi. section of bead	Defective position & shape	
No coated (0)			
S(15) +B(15)			
S(30) +B(30)			

Fig. 4.8 Formation of porosity as function of primer-coated thickness in bead welding (welding speed,  $v=2m/min$ )

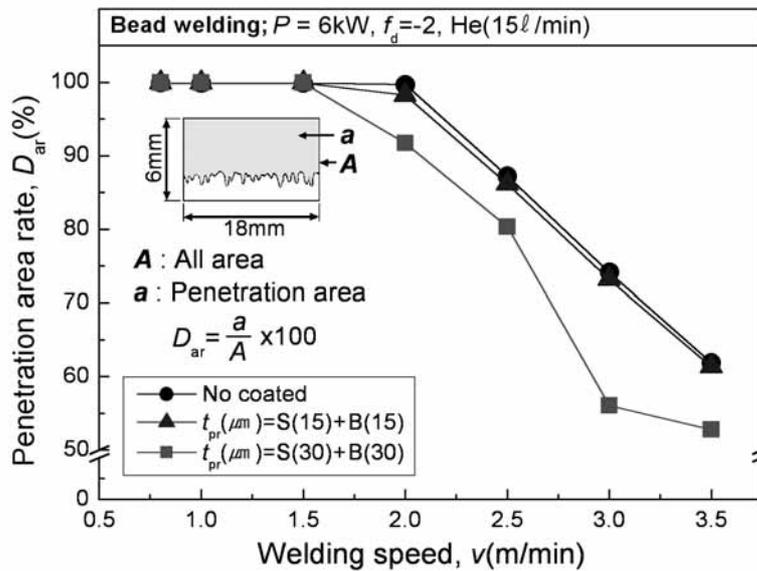


Fig. 4.9 Penetration area rate as function of weld speed and primer-coated thickness in bead welding

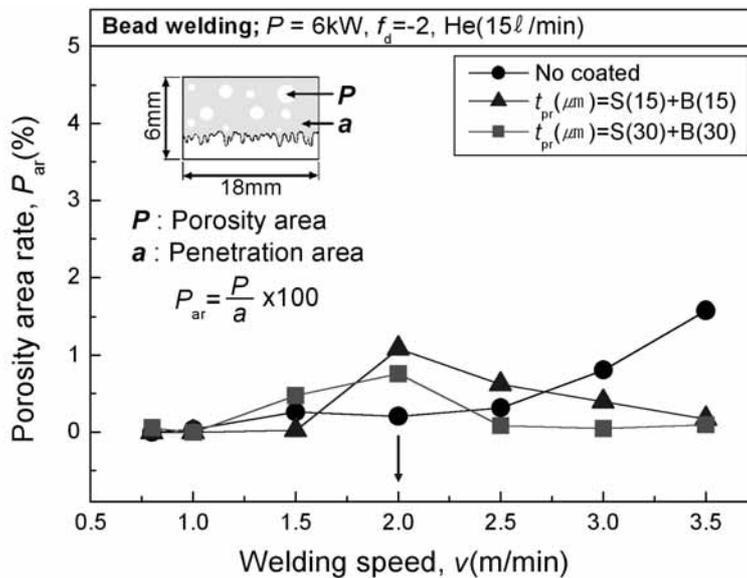


Fig. 4.10 Porosity area rate as function of weld speed and primer-coated thickness in bead welding

## (2) Butt welding(맞대기 용접)

Butt welding의 경우는 bead welding의 용접상황과 유사하여 용접 현상에 있어서 큰 차이는 볼 수 없었다. 단지 고려한다면 맞대기 부분의 primer코팅여부가 얼마나 큰 용접성의 차이를 가져올 것인가 하는 것이다.

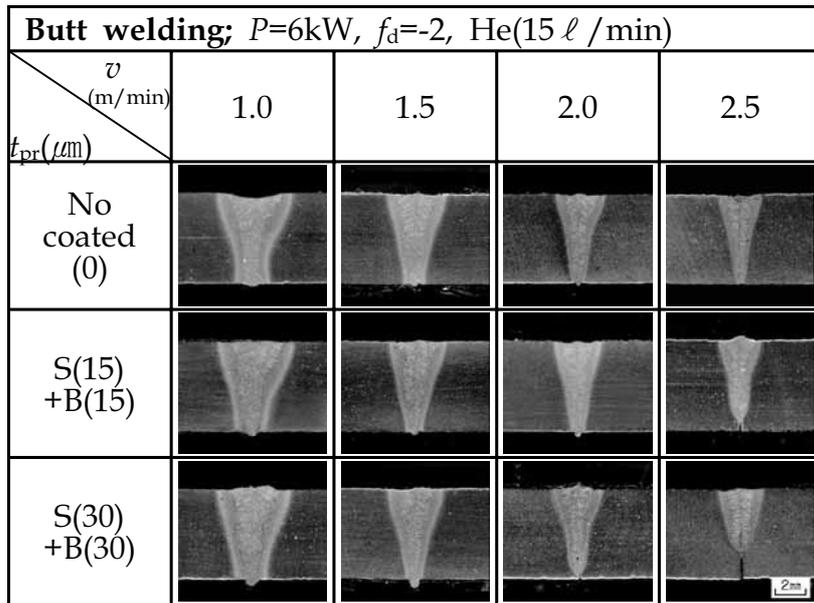
Fig. 4.11에 용접속도와 primer코팅조건에 따른 용입비드의 형상(a)과 용입깊이 및 전·후면 비드폭의 변화(b)를 각각 나타낸다. 용접속도가 빠를수록 비드 용입은 얇아지며, 용입이 얇아지는 정도는 비드표면의 코팅두께에 따라 그 영향이 뚜렷이 관찰된다. Butt welding의 경우, 완전용입조건을 만족시켜야 하므로 권장 용접속도는 1.0m/min이 되며, 1.5m/min에서 외관상 완전용입조건으로 보이지만 코팅강판의 경우 완전용입과 부분용입이 공존하는 임계치를 보이고 있으므로 피하는 것이 좋다.

Fig. 4.12와 Fig. 4.13에는 primer코팅조건에 따라, 완전용입에서 부분용입으로 바뀌는 용접속도에서 형성된 비드형상과 기공의 발생상황을 도시하는 매크로 조직사진을 각각 나타낸다. Fig. 4.12로부터, 간헐적으로 부분용입이 이루어지는 조건에서는 시험편의 하부에 많은 기공이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4.13의 매크로조직사진으로부터, 용접속도와 primer코팅두께변화에 따라 용입상황이 바뀌어 기공의 발생비율이 현저하게 증가하고 있음을 잘 나타내고 있으며, 균열은 찾아볼 수 없다.

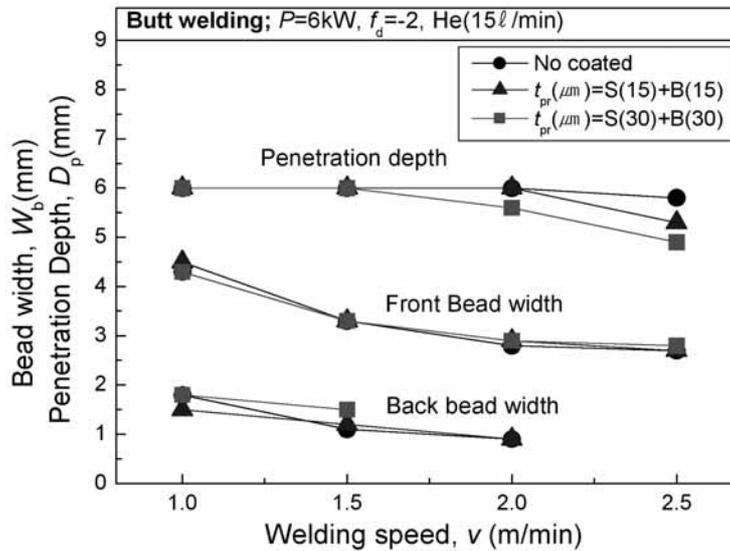
Fig. 4.14와 Fig. 4.15에 용접속도와 primer코팅조건에 따른 용입면적과 기공발생면적의 변화를 각각 나타내며, 전체적인 경향은 bead welding의 경우와 유사하다. 즉, 용접속도가 증가함에 따라 용입면적은

얇아지며, 그 정도는 코팅두께가 증가함에 따라 두드러지며, 기공발생 면적 비율도 코팅량이 두꺼울수록 증가하고 있다.

이상의 결과로부터, Butt welding에서는 bead welding과 같이 완전 용입 용접조건을 선정하게 되면 시험편의 표면에 코팅되는 primer가 용접성에는 지대한 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.



(a) Shape of weld bead

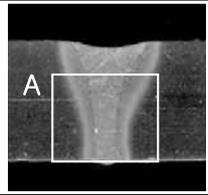
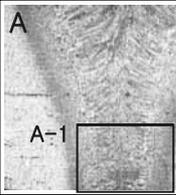
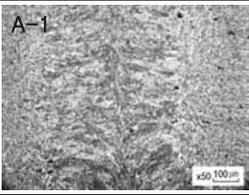
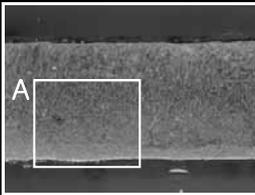
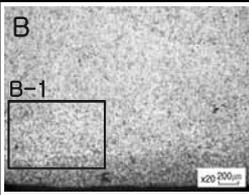
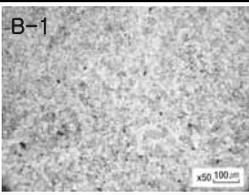
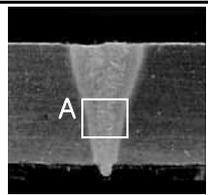
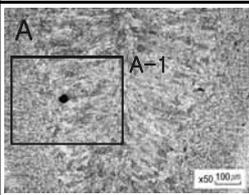
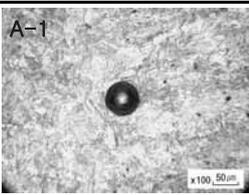
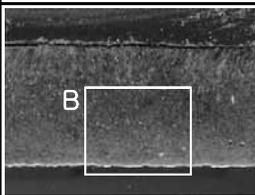
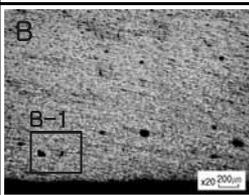
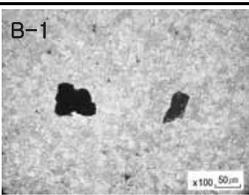
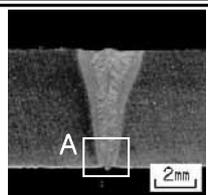
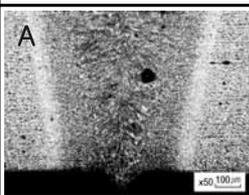
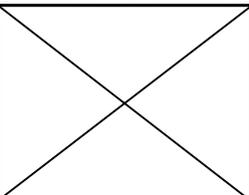
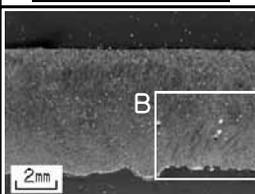
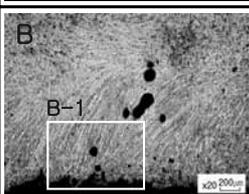
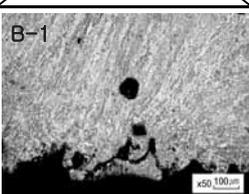


(b) Variation of penetration depth( $D_p$ ) and front/back bead width( $W_b$ )

Fig. 4.11 Variation of Weld bead, penetration depth( $D_p$ ) and bead width( $W_b$ ) as function of weld speed and primer-coated condition in butt welding

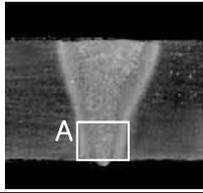
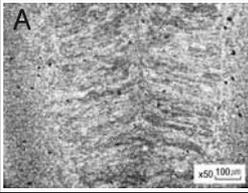
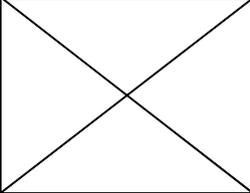
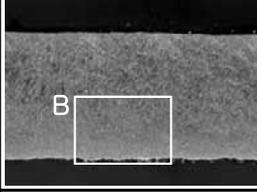
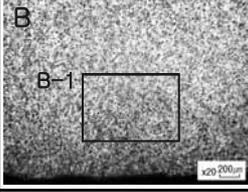
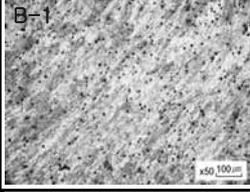
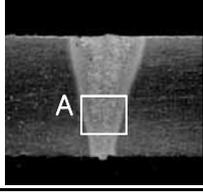
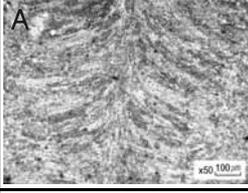
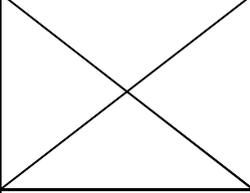
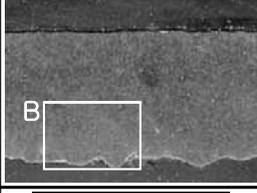
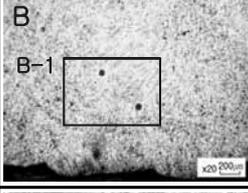
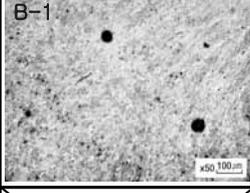
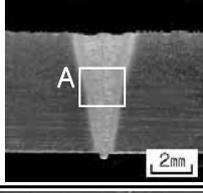
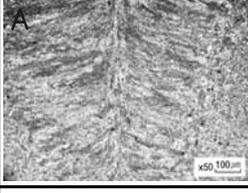
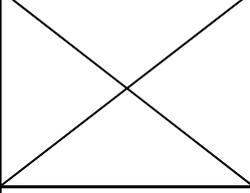
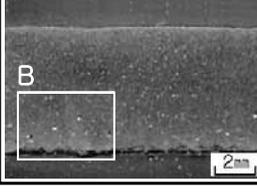
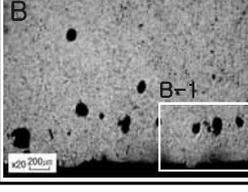
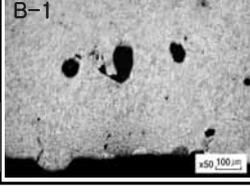
<b>Butt welding; <math>P=6\text{kW}</math>, <math>f_d=-2</math>, He(15 l / min)</b>						
$t_{pr}$ ( $\mu\text{m}$ )	Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance	Front	
					Back	
No coated	1.0					
	2.0					
S(15) +B(15)	1.0					
	2.0					
S(30) +B(30)	1.0					
	2.0					

Fig. 4.12 Variation of transverse/longitudinal section of bead and bead appearance as function of weld speed and primer- coated condition in butt welding

Butt welding; $P=6kW$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=0$ , He(15 $\ell$ /min)			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. & Longi. section of bead	Defective position & shape	
1.0		A 	A-1 
		B 	B-1 
1.5		A 	A-1 
		B 	B-1 
2.0		A 	
		B 	B-1 

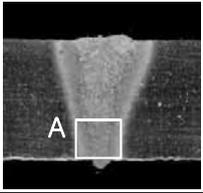
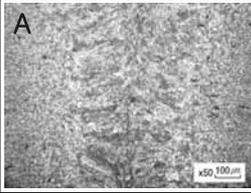
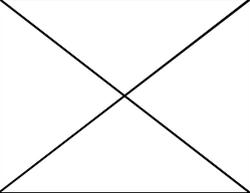
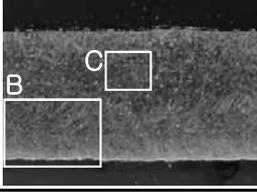
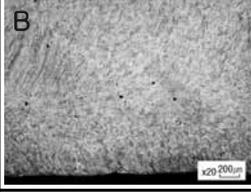
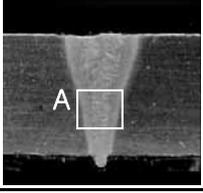
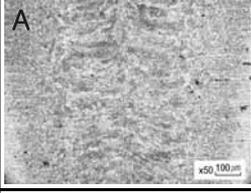
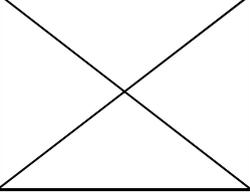
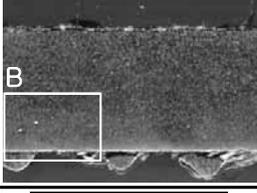
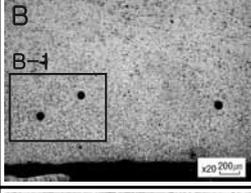
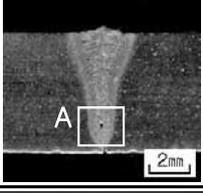
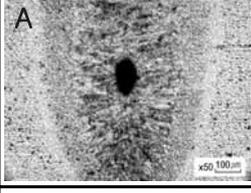
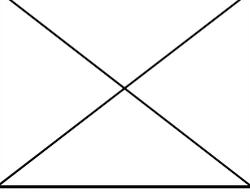
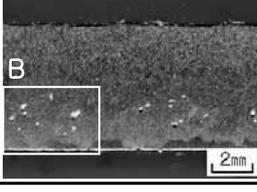
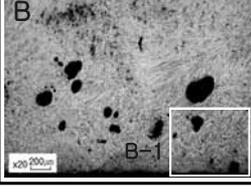
(a) No coated steel,  $t_{pr}(\mu m)=0$

Fig. 4.13 Formation of porosity as function of weld speed and primer-coated thickness in butt welding

Butt welding; $P=6kW$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(15)+B(15)$ , He(15 l /min)			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. & Longi. section of bead	Defective position & shape	
1.0			
			
1.5			
			
2.0			
			

(b) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu m)=S(15)+B(15)$

Fig. 4.13 To be continued

Butt welding; $P=6kW$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(15)+B(15)$ , He(15 l/min)			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. & Longi. section of bead	Defective position & shape	
1.0			
			
1.5			
			
2.0			
			

(c) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu m)=S(30)+B(30)$

Fig. 4.13 To be continued

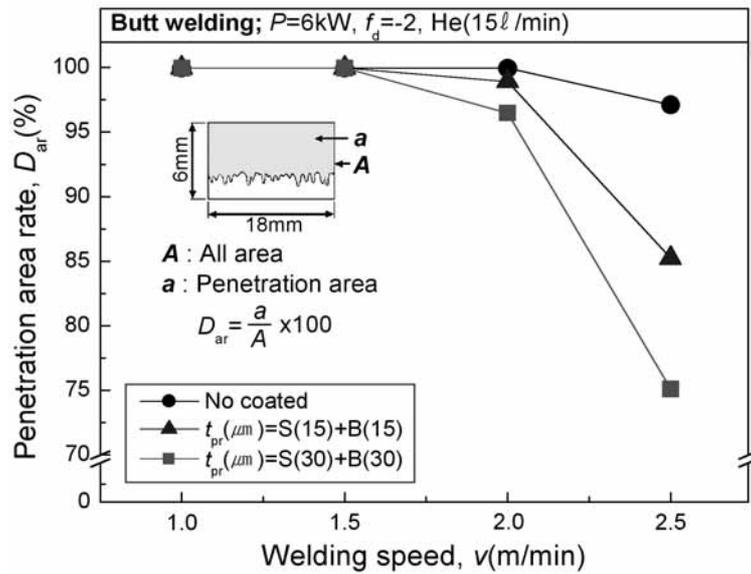


Fig. 4.14 Penetration area rate as function of weld speed and primer-coated thickness in butt welding

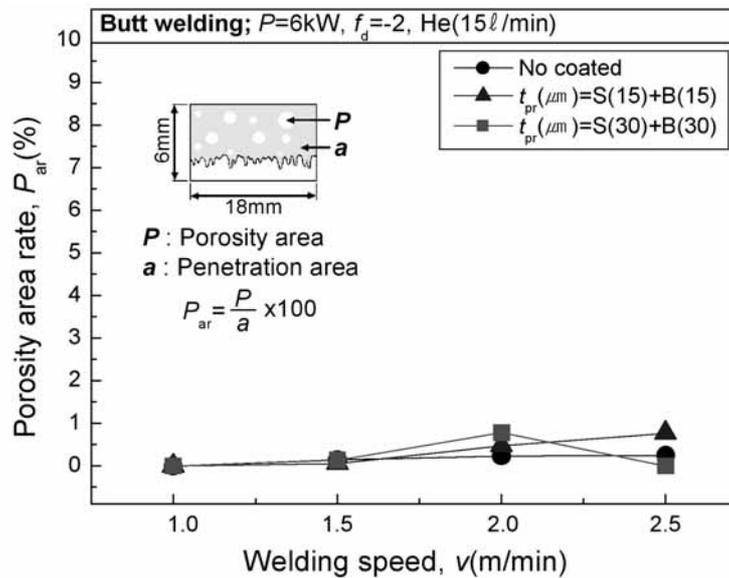


Fig. 4.15 Porosity area rate as function of weld speed and primer-coated thickness in bead welding

### (3) Lap welding(겹치기 용접)

Lap welding의 경우, 전술한 bead 및 butt welding의 경우와 달리 lap부위의 영향이 현저하게 나타남으로서 용접현상에 많은 차이를 보였다. 특히, lap부위에 존재하는 primer는 기공의 발생경향에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

Fig. 4.16(a)~(c)에 primer의 코팅두께( $t_{pr}$ )별 용접속도에 따라 형성된 용접비드의 횡단면, 종단면 및 전면비드(front bead)의 형상을 보이고 있다. 또한 Fig. 4.17에는 동일실험에서의 비드형상변화를 계측하여 그래프로 나타내었다. 집광광학계의 비초점거리 $f_d(\text{mm})$ 는 -2로 일정하게 하였으며, 출력  $P$ 는 He실드가스 분위기( $15 \ell / \text{min}$ )에서 최대출력인 6kW로 하였다. 본 실험에서는 용입특성에 미치는 lap의 영향을 검토하기 위해 lap사이에 별도의 간극을 두지 않았다. (a)~(c)의 조건별 primer코팅두께 ( $t_{pr}$ )는 표면측과 lap부위를 각각 S와 L로 표시하고, 각 위치에서의 코팅두께( $\mu\text{m}$ )를 괄호 속의 수치로 표시하였다. 예를 들어  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ 은, 피용접재의 시험편 표면에  $15\mu\text{m}$ 의 primer가 코팅되어 있고, lap부위에는 동일한 2장의 시험편이 겹쳐지게 되어 코팅두께가  $30\mu\text{m}$ 임을 의미한다.

실험의 결과로부터, 용접속도가 증가함에 따라 용입깊이가 얕아지며, 비드폭은 또한 좁아지는 경향을 보이고 있다. Lap welding에서 특이한 현상은, 키흔의 하부 선단이 Lap부위에 닿을 정도의 용접속도에서 스파터의 발생량이 두드러지게 증가하여 심한 humping 비드가 형성된다는 것이다. 즉(a)의 비코팅강판의 경우 2.5m/min, (b)와 (c)의 코팅강판의 경우 2.0m/min의 용접속도가 이에 해당한다. 전술한 바와 같이 Lap welding의 경우, Lap부위로부터 기공이 다량으로 발생되며, 코팅

강판의 경우 낮은 비점을 가진 primer의 증발에 기인하여 이러한 현상은 더욱 현저하게 발생하게 되는 것이다.

일반적으로 고밀도 에너지를 이용한 고속용접의 경우, 상대적으로 비드폭이 좁고 용입깊이는 깊게 되어 강한 증발압력이 키홀 내에 형성되게 되면 키홀을 통로로 하여 용융액이 비산되기 쉬워져 humping bead가 용이하게 생성되게 된다.

그러나 primer코팅강판의 경우 2.5m/min이상의 고속용접에서 오히려 스패터가 적어지고 있는 것은(Fig. 4.16 (b)와(c)의 2.5m/min이상의 용접속도) 비코팅강판에 비하여 비드폭이 상대적으로 넓게 형성되어 있음에 주목할 필요가 있다. 비록 Lap welding조건을 만족하지 못하는 얇은 용입조건이 되지만, 비드폭이 상대적으로 넓게 형성되므로 기공이 부상하여 소멸하기 쉽고 그 결과 스패터가 적게 발생하게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 4.18과 Fig. 4.19에는, Lap welding이 가능한 용접속도인  $v=0.8\text{m/min}$ 과  $v=1.0\text{m/min}$ 에서의 비드형상 변화와 매크로 조직사진을 각각 나타낸다.

Fig. 4.18의 (a)와(b)에서, primer코팅두께가 증가함에 따라 기공이 현저하게 발생하고 있으며, 비드표면에는 심한 스패터의 발생으로 humping 비드가 형성되어 있으며, 이것은 Fig. 4.19의 매크로 조직사진으로부터도 관찰할 수 있다. 용접결함은 주로 스파이킹 현상을 수반하면서 발생하는 기공과 스패터에 의한 humping bead이며, 균열과 같은 발생개소도 가끔 보이고 있으나 이것은 균열이라기보다는 형성된 기공 내부를 급속한 응고에 의해 용액이 미처 다 채우지 못한데서 기인한 미함몰부로 생각된다. 비코팅강판의 경우, 키홀 하부의 스파이킹

현상이 일어나는 저면에서 기공이 다수 발생되고 있으며, 코팅강판의 경우 스파이킹 현상부위를 비롯한 전반에 걸쳐서 다수의 기공과 스패터가 발생하고 있다. Primer의 증발현상은 기공의 형성과 스패터 발생에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.20은, Fig. 4.16(c)의 용접속도 2.5m/min에서 얻어진 용접결과이며, Lap부위에 코팅된 primer가 증발하여 용융금속에 다량의 기공을 제공하고 있으며, 이것은 Lap부위에 코팅된 primer가 기공발생의 주된 원인임을 입증하는 것이다. 이러한 기공과 스패터의 발생거동에 미치는 primer의 코팅두께와 코팅위치의 영향에 대해서는 본 절4.1의 4.1.4항에서 구체적으로 검토하기로 한다.

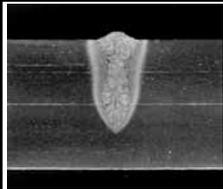
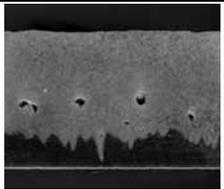
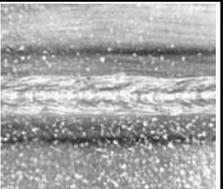
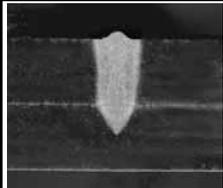
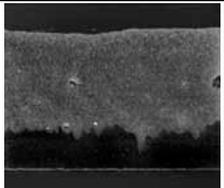
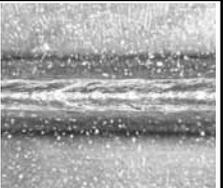
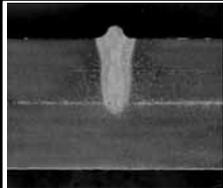
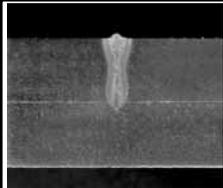
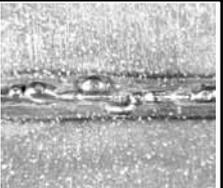
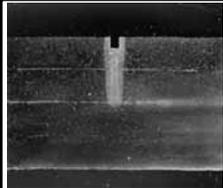
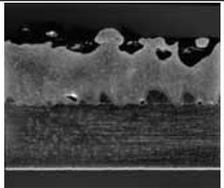
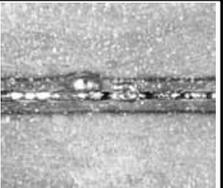
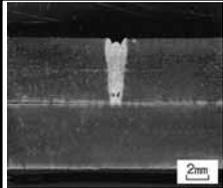
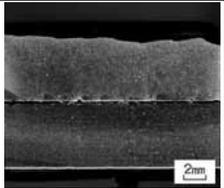
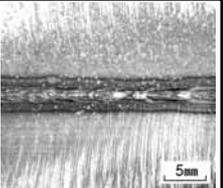
이상의 결과를, Fig. 4.21에 그래프로 정리하여 보면, 용접속도가 빠를수록 primer코팅조건에 따라 기공의 발생면적(a)에 큰 차이가 있으며, 이것은 (b)의 스패터 발생면적과 연계하여 검토하는 것이 바람직하다. 즉, primer코팅조건이  $t_p(\mu\text{m})=S(30)+L(60)$ 의 경우(■기호), (a)그림의 0.8m/min에서 기공의 발생면적이 높은 반면 (b)에서는 스패터 발생면적이 적은 양상을 보이고 있다. 용접속도를 2.0m/min으로 증가시키게 되면 (a)의 기공면적이 현저하게 줄어드는데 이것은 (b)의 스패터가 다량으로 발생한데 기인한 결과이다.

어느 경우에서도 용접속도내의 기공과 스패터의 발생에 primer의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.22에는 용접속도의 변화에 따른 용입특성의 관점에서, 4.1.1항에서 논의하였던 용접특성에 미치는 비초점거리의 영향을 primer코팅강판의 lap welding에 적용하여 비교·검토하였다.

Lap부위가 충분히 용융되는 용접속도  $v=1.0\text{m/min}$ 에서, 비초점거리

-2mm보다는 -4mm에서 비드폭이 넓어지면서 보다 안정된 비드가 얻어지고 있으며, 용입이 얕아지는  $v=1.5\text{m/min}$  경우 Lap부위의 primer성분이 지배적으로 증가하여 비초점의 효과도 미약하게 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은, primer가 코팅된 시험편의 경우에도 4.1.1항과 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 그 원인에 대해서는 이미 전항에서 설명하였다.

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=0$ , $G_c(\text{mm})=0$ , He(15 $\ell$ /min)			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0.8			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0	 2mm	 2mm	 5mm

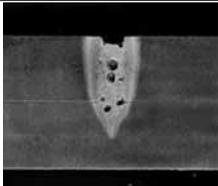
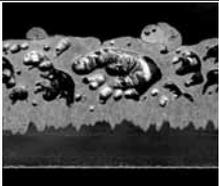
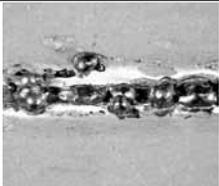
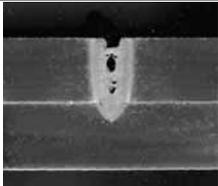
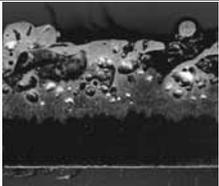
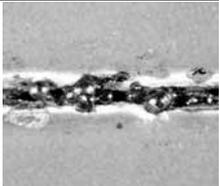
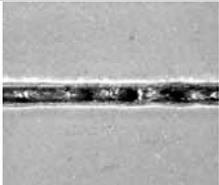
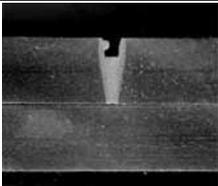
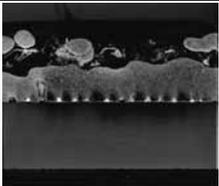
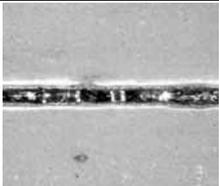
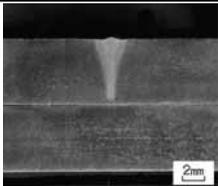
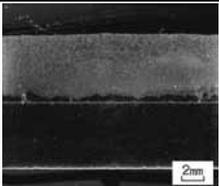
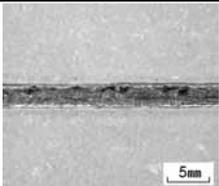
(a) No coated steel,  $t_{pr}(\mu\text{m})=0$

Fig. 4.16 Variation of transverse/longitudinal section of bead and bead appearance as function of weld speed and primer-coated thickness in lap welding

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(15)+\text{L}(30)$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $\text{He}(15\ell/\text{min})$			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0.8			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0			

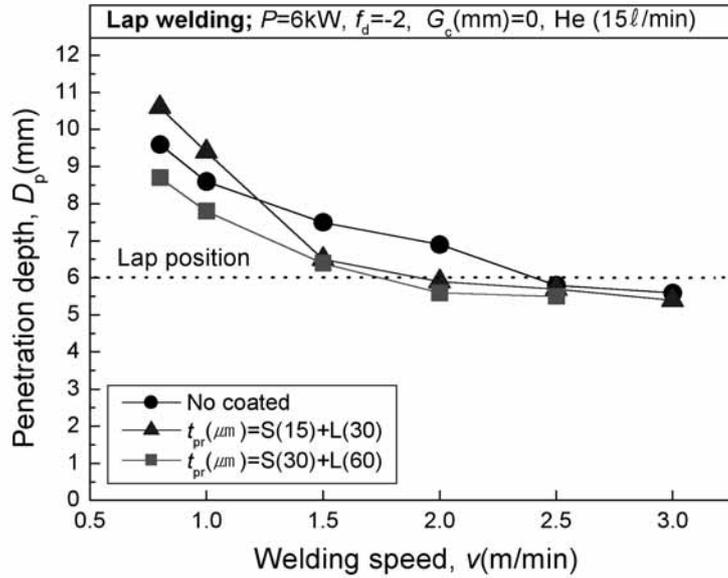
(b) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(15)+\text{L}(30)$

Fig. 4.16 To be continued

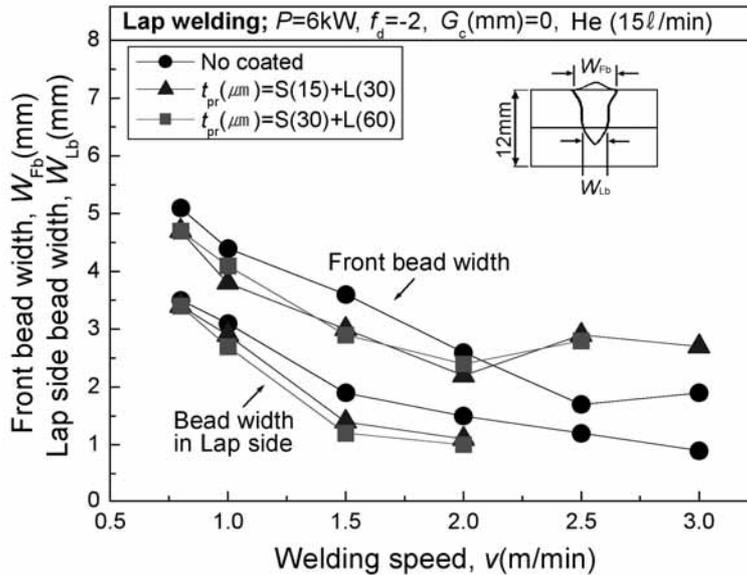
Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(30)+\text{L}(60)$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $\text{He}(15\text{ l / min})$			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0.8			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			

(c) Primer-coated steel,  $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(30)+\text{L}(60)$

Fig. 4.16 To be continued

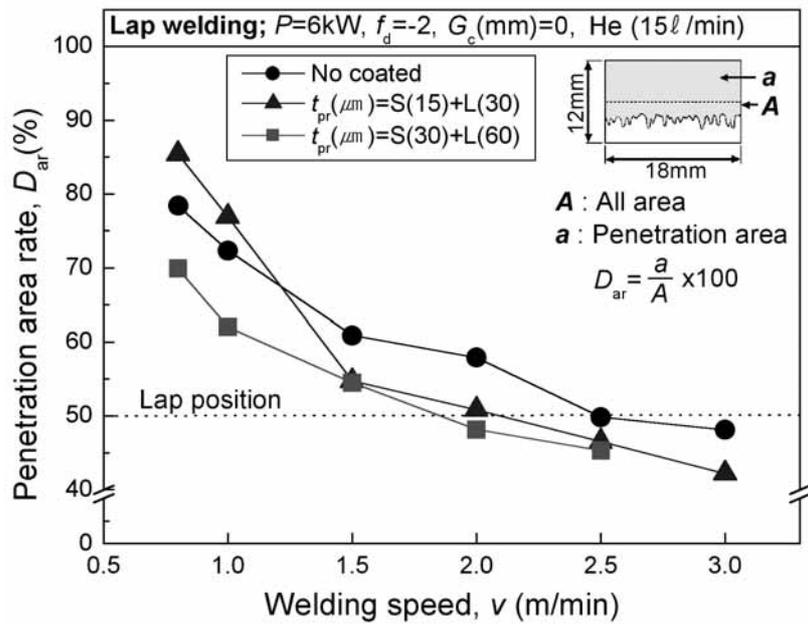


(a) Variation of penetration depth



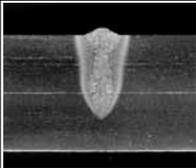
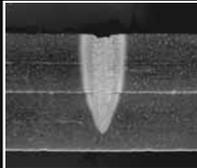
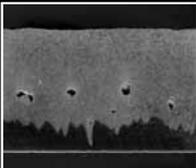
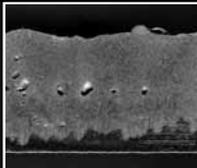
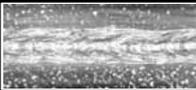
(b) Variation of bead width

Fig. 4.17 Characteristics of penetration as function of welding speed and primer coated thickness in lap welding

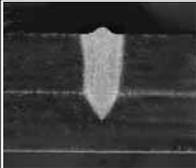
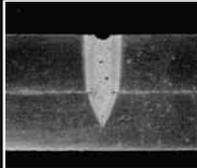
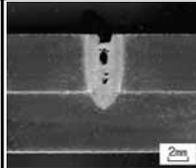
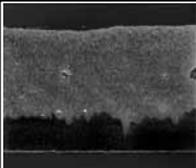
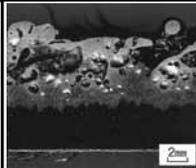
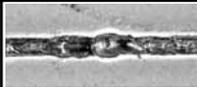
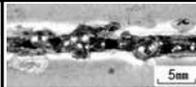


(c) Variation of penetration area rate

Fig. 4.17 To be continued

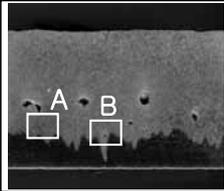
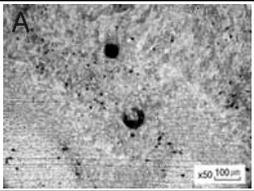
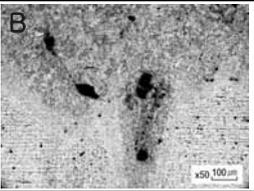
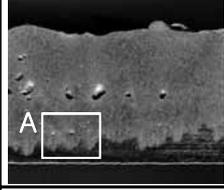
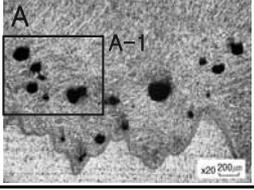
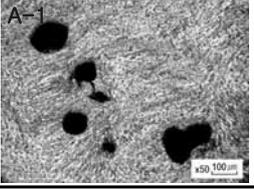
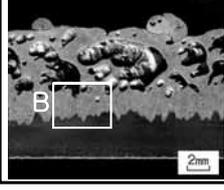
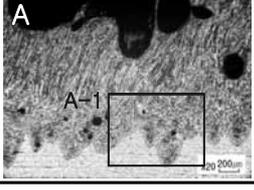
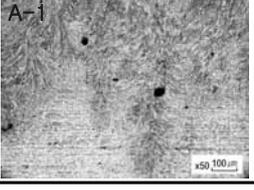
<b>Lap welding; <math>P=6\text{kW}</math>, <math>v=0.8\text{m/min}</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>G_c(\text{mm})=0</math>, He(<math>15\ell/\text{min}</math>)</b>			
Weld bead $t_{pr}(\mu\text{m})$	No coated	S(15)+L30)	S(30)+L(60)
Trans. section of bead			
Longi. section of bead			
Bead appearance			

(a)  $v=0.8\text{m/min}$

<b>Lap welding; <math>P=6\text{kW}</math>, <math>v=1\text{m/min}</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>G_c(\text{mm})=0</math>, He(<math>15\ell/\text{min}</math>)</b>			
Weld bead $t_{pr}(\mu\text{m})$	No coated	S(15)+L30)	S(30)+L(60)
Trans. section of bead			
Longi. section of bead			
Bead appearance			

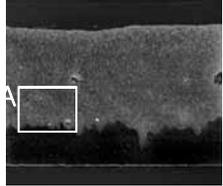
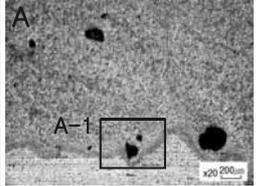
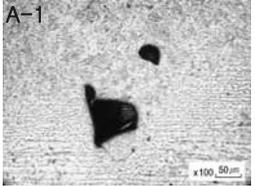
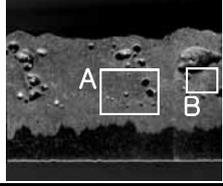
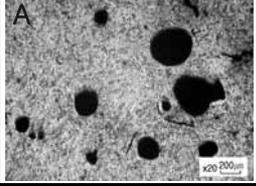
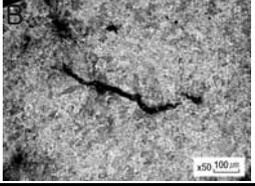
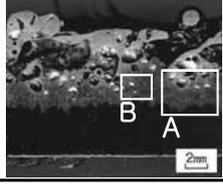
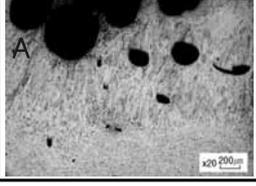
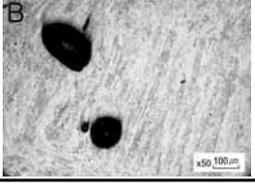
(b)  $v=1\text{m/min}$

Fig. 4.18 Characteristics of weld bead as function of primer-coated thickness in lap welding

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=0.8\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $\text{He}(15\ell/\text{min})$			
Weld bead $t_{pr}(\mu\text{m})$	Longi. section of bead	Defective position & shape	
No coated			
S(15) +L(30)			
S(30) +L(60)			

(a)  $v=0.8\text{m/min}$

Fig. 4.19 Formation of weld defects as function of primer-coated thickness in lap welding

Lap welding ; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $\text{He}(15\text{ l / min})$			
Weld bead $t_{pr}(\mu\text{m})$	Longi. section of bead	Defective position & shape	
No coated			
S(15) +L(30)			
S(30) +L(60)			

(b)  $v=1\text{m/min}$

Fig. 4.19 To be continued

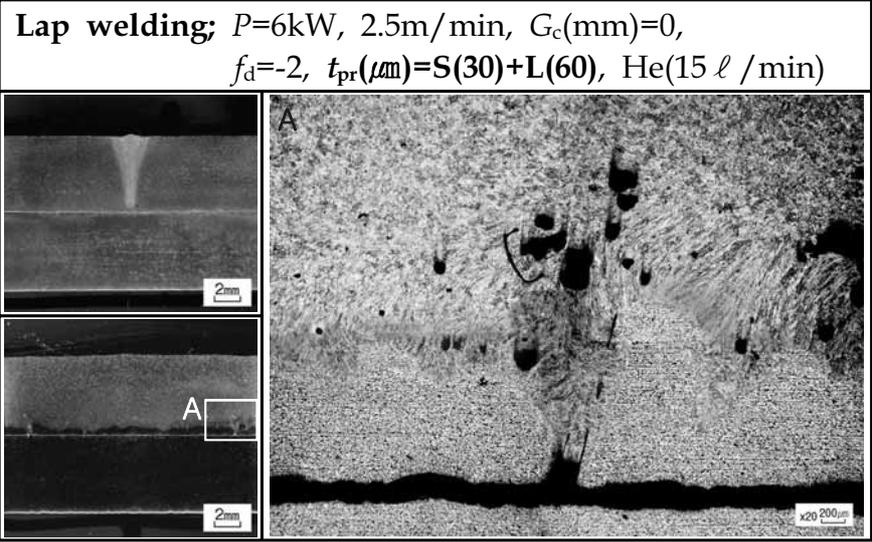
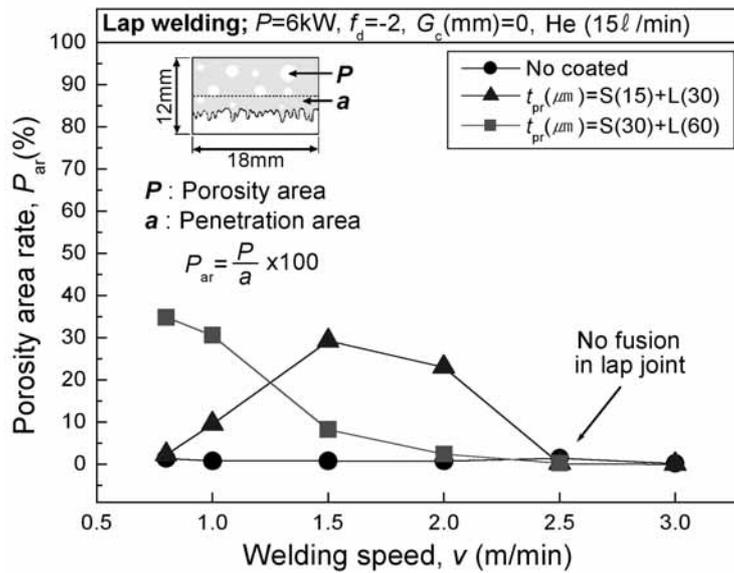
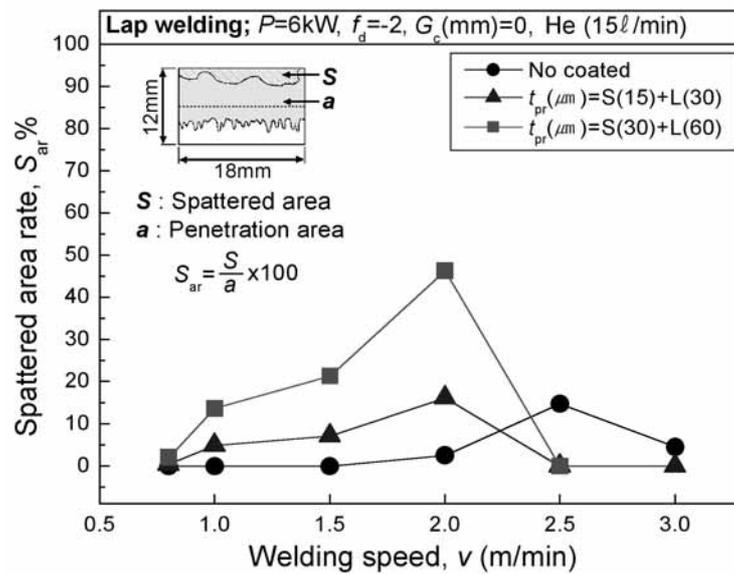


Fig. 4.20 Porosity formation in lap welding on primer-coated steel

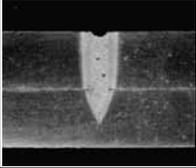
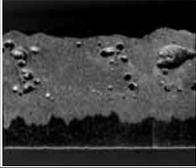
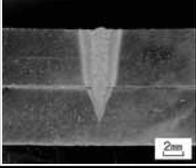
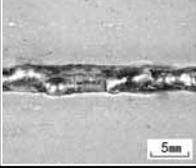


(a) Variation of porosity area rate

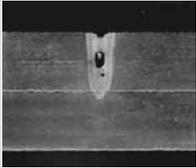
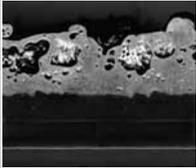
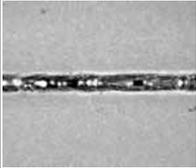
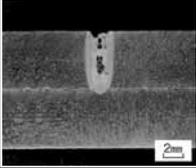
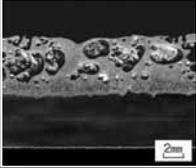
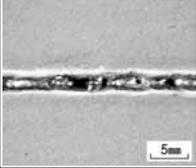


(a) Variation of spatter formation area rate

Fig. 4.21 Weld defects area rate as function of welding speed and primer coated thickness in lap welding

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ , He(15 $\ell$ / min)			
$f_d(\text{mm}) \backslash$ Weld bead	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
-2			
-4			

(a)  $v=1\text{m/min}$

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1.5\text{m/min}$ , $G_c(\text{mm})=0$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ , He(15 $\ell$ / min)			
$f_d(\text{mm}) \backslash$ Weld bead	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
-2			
-4			

(b) 1.5m/min

Fig. 4.22 Characteristics of penetration as function of defocused distance and weld speed in lap welding

## 4.2 Lap welding에 있어서 용접특성에 미치는 primer코팅조건 및 gap간극의 영향

### 4.2.1 Primer 코팅위치 및 코팅두께에 따른 용접특성 비교

지금까지의 실험에서, primer의 증발현상에 의해 레이저 용접성에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 특히 lap welding의 경우 다량의 기공과 스파터를 수반하는 용접결함이 발생함을 알 수 있었다.

본 항에서는 기공과 스파터의 발생에 영향을 미칠 수 있는 시험편의 primer코팅위치 및 코팅두께에 따른 용접성을 평가하여 그 지배정도를 검토하고자 한다. 본 실험에서는 primer의 코팅위치가 레이저 용접성에 미치는 지배정도를 조사하기 위해 Gap간극( $G_c$ )을 두지 않았으며 He실드분위기에서 출력( $p$ )은 6kW, 비초점거리  $f_d$ 는 -2mm의 조건에서 용접을 행하였다.

Fig. 4.23은 lap welding시의 lap부위에만 15 $\mu$ m코팅을 한 후 용접속도를 변화시켰을 때의 용입형상을 나타낸다. 1.0m/min의 속도에서 다수의 스파이킹현상을 수반하는 가운데 1.5m/min의 용접속도에서는 용입깊이가 상대적으로 얇아짐에 따라 lap부위에 있는 primer의 폭발적 증발에 의하여 용융액과 희석되지 못한 가운데 심한 humping비드를 만들어 내고 있다. 2.0m/min의 속도에서는 용입깊이가 더욱 얇아져 lap부위의 primer를 충분히 증발시키지 못함에 따라 humping비드는 보이지 않고 있으나 용융부의 저부에서 많은 기공이 생성되어 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 4.24는 이러한 용접속도의 가변범위 내에서 primer의 코팅위치에 따른 용입깊이와 비드폭의 변화를 보이고 있다. Fig. 4.25에는 1m/min의 일정한 용접속도에서 얻어진 primer코팅위치와 두께에 따

른 용입면적의 비율을 나타내며, 그때의 용접비드의 형상과 매크로 조직사진을 Fig. 4.26~Fig. 4.28에 각각 나타낸다.

Fig. 4.24의 결과로부터, 용입깊이는 primer의 코팅위치에 따라  $S(0)+L(15)>S(15)+L(15)>S(15)+L(0)$ 의 순으로 점차 얕아짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4.25에서 나타내듯이 일정한 용접속도 1m/min에서 코팅위치에 따라 코팅두께를 15에서  $30\mu\text{m}$ 로 증가시켰을 때 용입면적비율의 변화는  $S(0)+L(X)>S(X)+L(X)>S(X)+L(0)$ 의 순서대로 lap부위에만 코팅된 경우가 가장 크며, 표면만 코팅된  $S(X)+L(0)$ 의 조건에서는 거의 영향을 미치지 못하고 있다.

이러한 상황을 Fig. 4.26~Fig. 4.28의 비드형상과 매크로 조직사진으로부터 분석하여 매우 흥미로운 결과를 도출할 수 있었다. “시험편의 표면”, “Lap부위”, 그리고 “표면과 Lap부위 양측”의 제각기 다른 primer코팅위치에서, 코팅두께를 15에서  $30\mu\text{m}$ 로 증가시켰을 때의 용입 특성을 비교하고 기공과 스파터의 발생여부에 미치는 지배정도를 검토하였다.

Lap위치에만 코팅되어 있는 Fig. 4.26의 경우,  $15\mu\text{m}$ 의 코팅조건에서는 humping현상이 일어나지 않았으나  $30\mu\text{m}$ 로 코팅두께를 증가시킬 경우 심한 스파터를 수반하며 다량의 기공과 humping비드를 만들어 내고 있는 반면, 표면에만 코팅되어 있는 Fig. 4.27의 경우에는 용입형상에 큰 차이를 찾아볼 수 없다.

반면 시험편의 표면과 lap위치의 양측에 코팅된 경우에는  $15\mu\text{m}$ 의 코팅조건에서도 스파터에 의한 humping비드가 형성되어 있으며  $30\mu\text{m}$ 로 증가시키게 되면 스파터 현상이 더욱더 심하게 되고 기공이 다량으로 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 Fig. 4.29 및 Fig. 4.30에 도식화하여 primer코팅위치에 따른 기공면적과 스페터의 발생면적비율의 변화에 대하여 그래프로 나타내었다. 즉 Fig. 4.26~Fig. 4.28의 실험결과로부터, lap위치에 코팅된 primer의 폭발적 증발은 스페터를 유발시켜 humping비드를 발생시키는 주인자가 되며, 표면부에서의 코팅조건은 기공과 스페터의 발생거동에 미치는 영향이 매우 적은 것을 알 수 있다. 그러나 lap위치와 표면에 동시에 코팅된 경우 기공과 스페터의 발생을 더욱 가속화시켜 심한 humping비드를 만들어 내고 있음을 확인할 수 있다.

본 항의 실험결과로부터, 표면부에 코팅된 primer는 용융금속에 유입되기 전에 많은 에너지를 흡수하여 대부분 증발하는 반면, lap부위에 코팅된 primer는 용융금속으로 직접 유입되기 때문에 기공과 스페터의 발생거동에 지대한 영향을 미치는 주인자임을 확인하였다. 또한 표면과 lap부위의 양측에 코팅된 경우 이러한 현상은 더욱 가속화됨을 알 수 있었다.

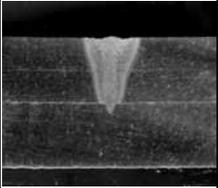
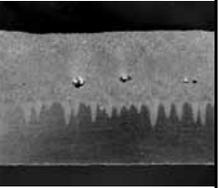
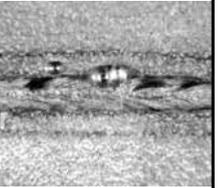
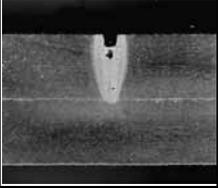
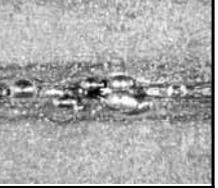
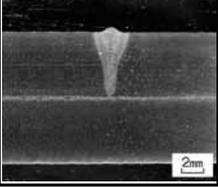
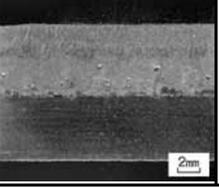
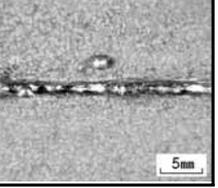
Lap welding; $P=6kW$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(0)+L(15)$ , $G_c(mm)=0$ , He(15 $\ell$ /min)			
Weld bead $v$ (m/min)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
1.0			
1.5			
2.0			

Fig. 4.23 Characteristics of weld defects formation and penetration as function of weld speed and primer-coated position (15 $\mu m$  primer-coated only in lap side)

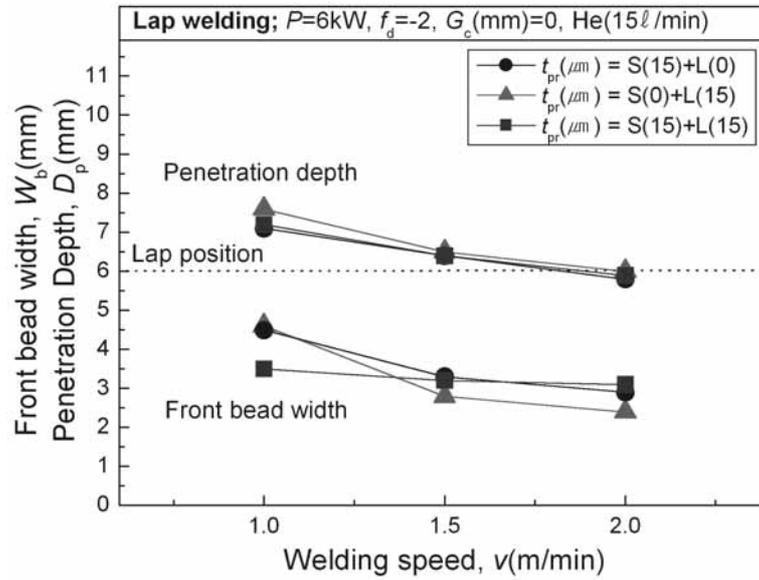


Fig. 4.24 Variation of penetration depth and front bead width as function of weld speed and primer-coated condition

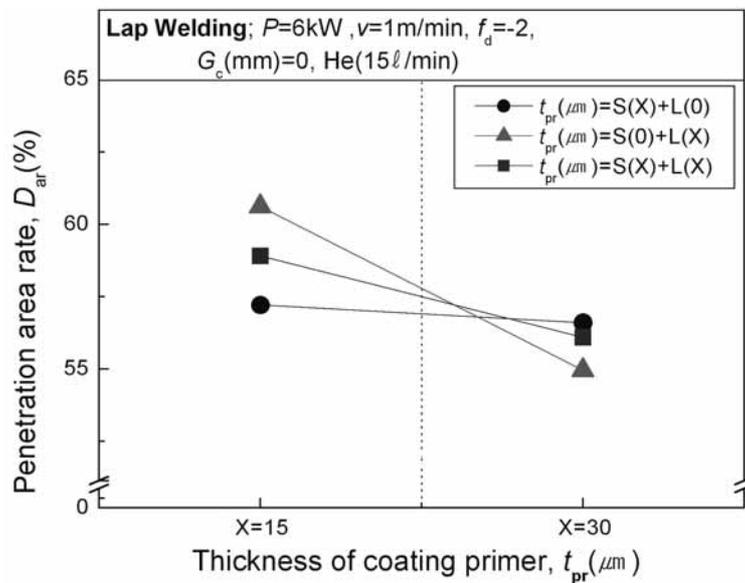


Fig. 4.25 Variation of penetration area rate as function of primer-coated thickness and position

<b>Lap welding:</b> $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , $G_c(mm)=0$ , $He(15\ell/min)$			
$v(m/min)$ coated condition	Trans. bead	bead appearance	Defective position & shape
	Longi. section of bead		
S(0) +L(15)			
S(0) +L(30)			

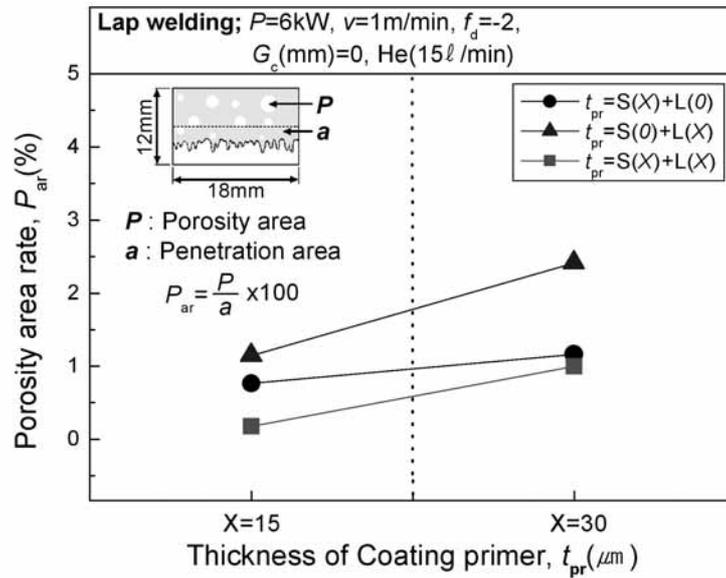
Fig. 4.26 Formation of weld defects as function of primer-coated position and thickness in lap welding (primer-coated in only lap side)

<b>Lap welding:</b> $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , $G_c(mm)=0$ , $He(15\ell/min)$			
$v(m/min)$ coated condition	Trans. bead	bead appearance	Defective position & shape
	Longi. section of bead		
S(15) +L(0)			   
S(30) +L(0)			   

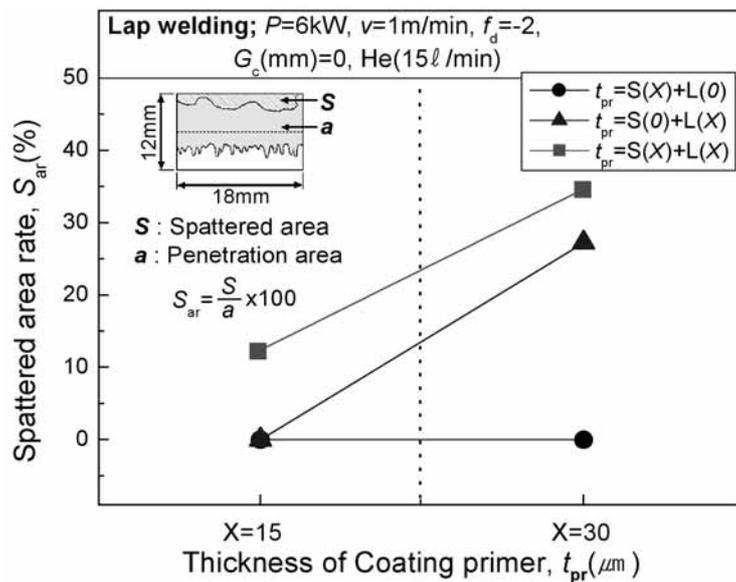
Fig. 4.27 Formation of weld defects as function of primer-coated position and thickness in lap welding (primer-coated in only surface)

<b>Lap welding; <math>P=6kW</math>, <math>v=1m/min</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>G_c(mm)=0</math>, He(<math>15\ell/min</math>)</b>			
$v(m/min)$ coated condition	Trans. bead	bead appearance	Defective position & shape
	Longi. section of bead		
S(15) +L(15)			   
S(30) +L(30)			 

Fig. 4.28 Formation of weld defects as function of primer-coated position and thickness in lap welding (primer-coated in lap side and surface)



(a) Porosity area rate



(b) Spatter formation area rate

Fig. 4.29 Weld defects area rate as function of primer-coated position and thickness

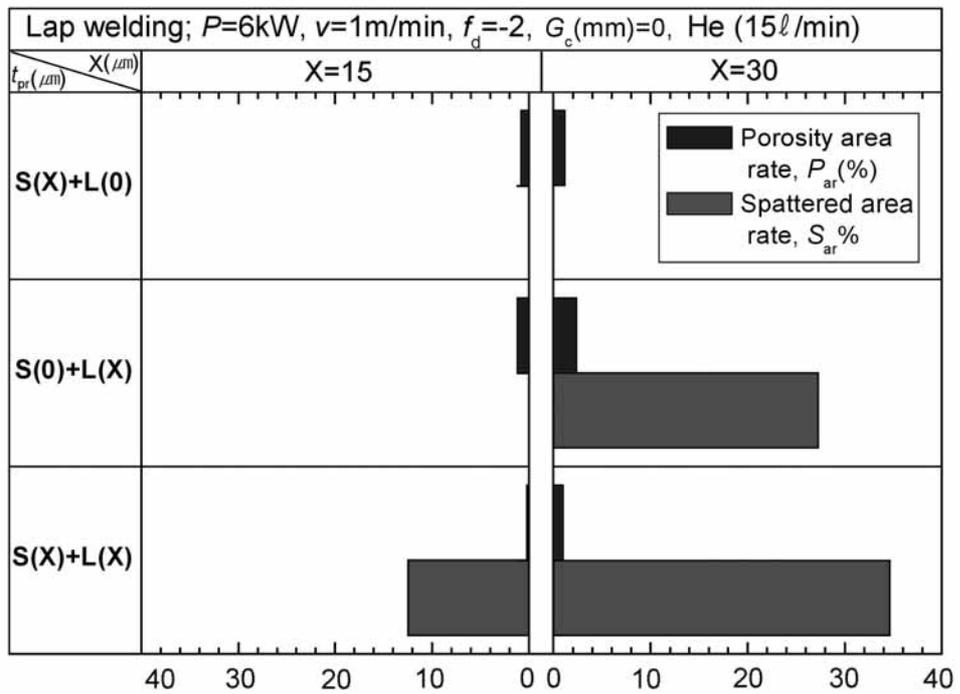


Fig. 4.30 Characteristics of weld defects formation and penetration as function of primer-coated position and thickness (refer to fig. 4.35)

#### 4.2.2 용접특성에 미치는 gap간극의 영향

전술한 4.1.2항에서, bead 및 butt welding의 완전용입조건에서는 primer코팅조건이 용접성에 많은 영향을 미치지 못하는 못하였으나, lap welding의 경우 용접금속내 기공이나 스패터 발생에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한 4.2.1항에서는 lap welding시 기공과 스패터발생의 주된 지배인자는 lap부위에 코팅된 primer의 증발에 의한 것임을 확인하였다.

따라서 본 항에서는, lap welding시 primer의 증발 메카니즘에 대해 주목하고, lap부위에 형성하는 primer의 증발압력을 누출시키기 위하여 gap간극을 돕으로서 용융금속에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

Fig. 4.31의 (a)와 (b)에는, 15 $\mu\text{m}$  및 30 $\mu\text{m}$ 의 primer코팅강판에 대하여 최대출력( $P$ )=6kW, 용접속도( $v$ )=1m/min, 비초점 거리( $f_a$ )를 -2mm로 하고, gap간극( $G_c$ )을 0.05~0.30까지 변화시켰을 때의 용접특성을 나타낸다.

또한, Fig. 4.32에는 gap간극( $G_c$ )에 따른 형상지수, 즉 용입깊이( $D_p$ ), 비드폭( $W_b$ ) 및 용입면적( $D_{ar}$ )비율의 변화를 각각 나타낸다. Fig. 4.31(a)와 (b)의 gap간극 변화에 따른 용접비드의 횡단면, 종단면 및 전면비드 형상을 비교하여 볼 때, 일정한 규칙성이 있음을 발견할 수 있다. 즉, 비드횡단면의 표면humping여부, 종단면에서의 humping정도와 기공의 발생경향, 전면비드의 외관을 면밀히 분석하여 보면, (a)의  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ 의 경우에는 gap간극이 0.08 및 0.10mm에서, (b)의  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(30)+L(60)$ 의 경우에는 gap간극이 0.15 및 0.20mm에서 humping 및 기공 등의 결함이 적고 표면비드는 미려한 전반적으로 양호한 용접 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 4.31 및 Fig. 4.32로부터, gap간극이 변화하여도 용입깊이는 primer코팅두께가 얇은 것이 보다 깊게 나타나며, 비드폭의 변화는 크지 않았다. 또한 용입깊이는 gap간극을 증가시켜감에 따라 미소한 증가현상을 보였으며, 이는 Fig. 4.32(b)의 gap간극에 따른 용입면적비율의 변화에서도 확인할 수 있다.

다음에는 15 $\mu\text{m}$ 와 30 $\mu\text{m}$ 의 primer코팅조건에서, gap간극에 따른 용접결합의 발생상황을 Fig. 4.33(a)와 (b)에 도시하고, gap간극에 따른 기공면적 비율과 스파터 발생면적 비율을 Fig. 4.34(a)와 (b)에 각각 그래프로 정리하였다.

우선 primer 표면코팅량이 15 $\mu\text{m}$ 인 Fig. 4.33(a)의 매크로 조직사진으로부터 gap간극이 0.05mm이하 및 0.15mm이상에서 비드의 심한 스파터 발생으로 humping비드가 생성되어 있음을 알 수 있다. 특히 이러한 현상은 전자보다 후자인 0.15mm 이상의 gap간극에서 현저하게 관찰되고 있는데, 이러한 현상은 지나친 gap간극을 주게될 경우 용액의 일부가 lap부위를 따라 소실하게 되며 그 소실된 만큼 비드표면에는 움푹 들어간 듯한 humping비드가 형성되고, 레이저빔은 humping부위를 통하여 더욱 집중됨에 따라 용입깊이의 근소한 증가를 가져오는 것으로 판단된다.

실제 Fig. 4.33(a)의 0.15mm이상의 gap간극에서 lap부위의 bead폭이 넓게 형성되어 있으며, gap간극을 따라 용액의 일부가 비산도중 트랩되어 있는 모습을 모두 관찰할 수 있다. 그리고 용접금속내의 기공은 스파이킹 발생부위를 중심으로 다량으로 형성되어 있으며 일부 균열과 같은 결함도 관찰되고 있으나, 이것은 기공 내를 미처 용액이 함입하지 못한데서 기인한 기공의 미함몰부 정도로 보는 것이 적절한 것으로

판단된다. 그러나 gap 간극이 0.10mm의 조건에서는 전반적으로 비드의 외관이 보다 미려하며, 일부 비드 저면에 미소한 기공이 간헐적으로 관찰되고 있으나, 그 크기가  $100\mu\text{m}$ 이하이고 연속적으로 존재하지 않고 있다는 점에서 접합강도에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 사려된다.

또한 primer표면코팅량이  $30\mu\text{m}$ 인 (b)의 경우에도 유사한 경향을 보이고 있으며 기공과 스패터의 발생정도가 보다 심한 양상을 보이고 있다. 그러나 gap간극이 0.15mm에서 스패터에 의한 humping현상이 적고 기공 등의 결함이 상대적으로 적은 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 일부 균열과 같은 직선상의 결함이 발견되고 있으나 이것은 용접 중 키흔의 불규칙한 동적 거동에 기인한 lap부위의 일부 미용융부위가 노출된 것으로 주된 결함인자는 아니라 할 수 있다. 0.20mm의 gap간극의 경우도 0.15mm간극의 경우만큼은 못하다 하더라도 다소 미려한 용접비드를 보이고 있다.

이상의 실험 결과를 정리하면, Fig. 4.34로부터 (a)의 기공발생면적은 (b)의 심한 스패터의 발생결과로 상대적으로 적은 값을 보였다. 스패터가 적어서 humping 비드가 없는 양호한 비드는  $15\mu\text{m}$ 표면코팅강판의 경우(▲표시) 0.10mm gap간극을 중심으로 한 주변에서, 그리고  $30\mu\text{m}$  표면코팅강판의 경우(■표시) 0.15mm gap간극을 중심으로 한 주변에서 건전한 용접결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 4.35와 Fig. 4.36에 15 및  $30\mu\text{m}$ 의 primer표면코팅 두께에서 얻어진 건전한 lap용접결과를 매크로 조직사진과 더불어 결함의 발생 조건과 대비·비교하여 나타내었다. 즉,  $15\mu\text{m}$ 의 primer표면 강판의 경우 gap간극을 0.8 및 1.0mm로,  $30\mu\text{m}$ 의 코팅강판의 경우 0.15 및 0.20mm

의 간극에서 양호한 용접결과를 얻을 수 있었다. 이것은 lap부위에 적절한 간극을 유지함으로써 강의 주된 원소인 Fe의 용점보다 낮은 비점을 가진 primer의 증발압력을 gap간극을 통하여 완화시켜 줌으로써 용융금속 내로 폭발적으로 이루어지는 기공의 공급원을 차단하고 스패터의 발생원인을 제거한 결과라고 판단된다.

기공의 발생원인에 대한 재료학적 검토는 4.3절에서 구체적으로 다루고, 스패터가 발생하여 humping비드가 형성되는 메카니즘은 4.5절에서 보다 상세히 검토하기로 한다.

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ , He( $15\ell/\text{min}$ )			
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
0.05			
0.08			
0.10			
0.12			
0.15			

(a)  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$

Fig. 4.31 Variation of transverse and longitudinal section of bead and front bead appearance as function of gap clearance in lap welding of primer-coated steel

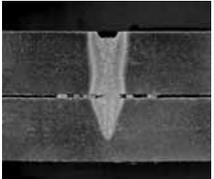
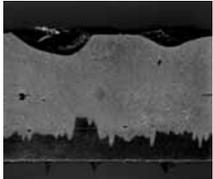
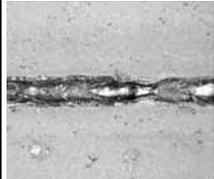
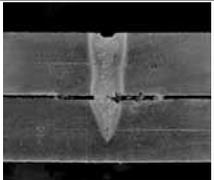
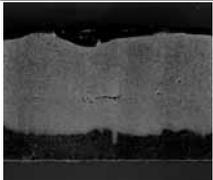
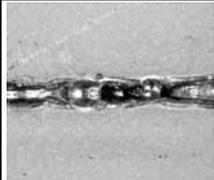
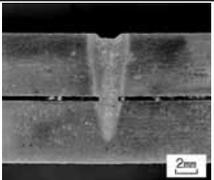
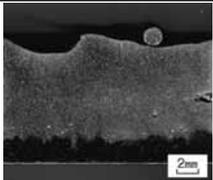
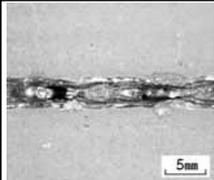
Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(15)+\text{L}(30)$ , He(15 $\ell$ / min)			
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0.20			
0.25			
0.30	 2mm	 2mm	 5mm

Fig. 4.31 (a) To be continued

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=S(30)+L(60)$ , He( $15\ell/\text{min}$ )			
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0			
0.05			
0.08			
0.10			
0.12			
0.15			

(b)  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$

Fig. 4.31 To be continued

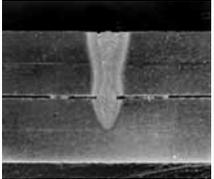
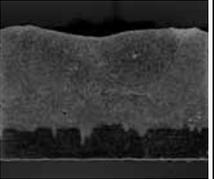
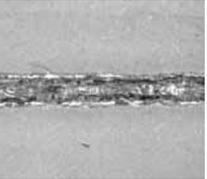
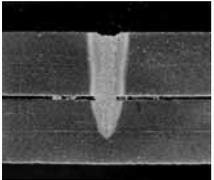
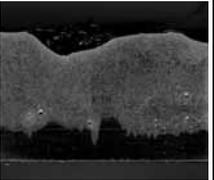
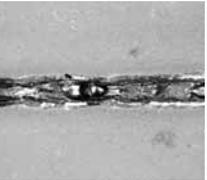
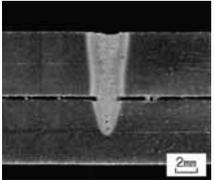
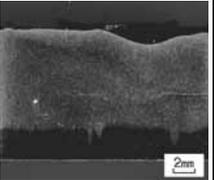
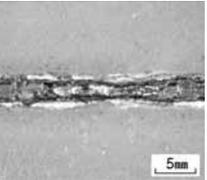
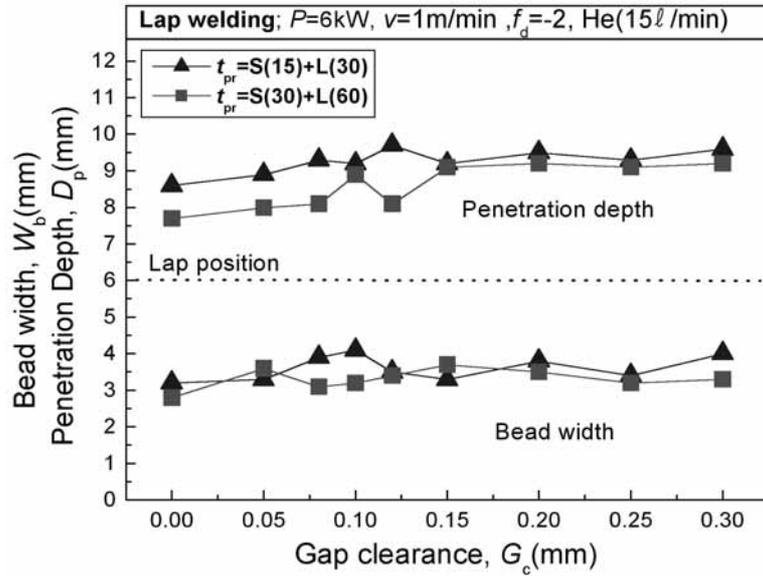
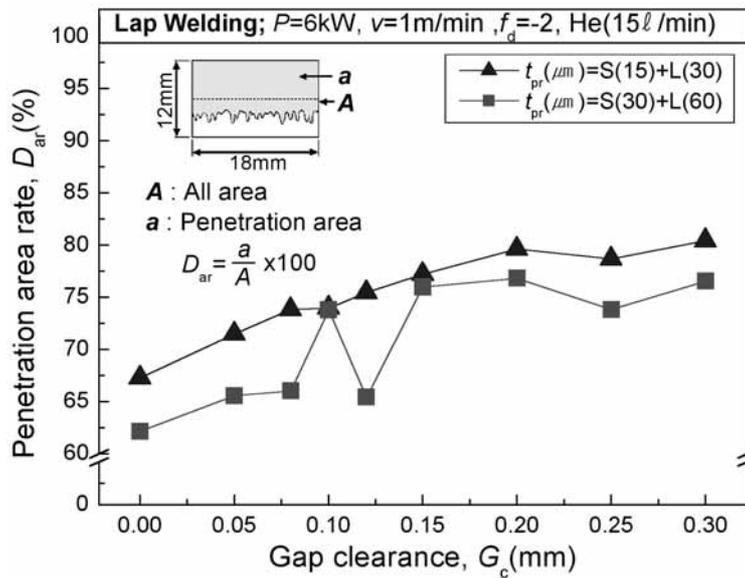
Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=\text{S}(30)+\text{L}(60)$ , He( $15\ell/\text{min}$ )			
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. section of bead	Longi. section of bead	Bead appearance
0.20			
0.25			
0.30	 <small>2mm</small>	 <small>2mm</small>	 <small>5mm</small>

Fig. 4.31 (b) To be continued



(a) Variation of penetration depth and front bead width



(b) Variation of penetration area rate

Fig. 4.32 Characteristic of penetration as function of gap clearance on primer-coated steel

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$ , He(15 $\ell$ / min)				
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. bead	Bead appearance	Defective position & shape	
	Longi. section of bead			
0			A 	
			B  C 	
0.05			A 	B 
			C  C-1 	C-1 
0.10			A 	
			B  C 	

(a)  $t_{pr}(\mu\text{m})=S(15)+L(30)$

Fig. 4.33 Formation of weld defects as function of gap clearance on primer-coated steel

Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(15)+L(30)$ , He(15 l / min)			
Weld bead $G_c$ (mm)	Trans. bead	Bead appearance	Defective position & shape
	Longi. section of bead		
0.15			
0.20			
0.25			

Fig. 4.33 (a) To be continued

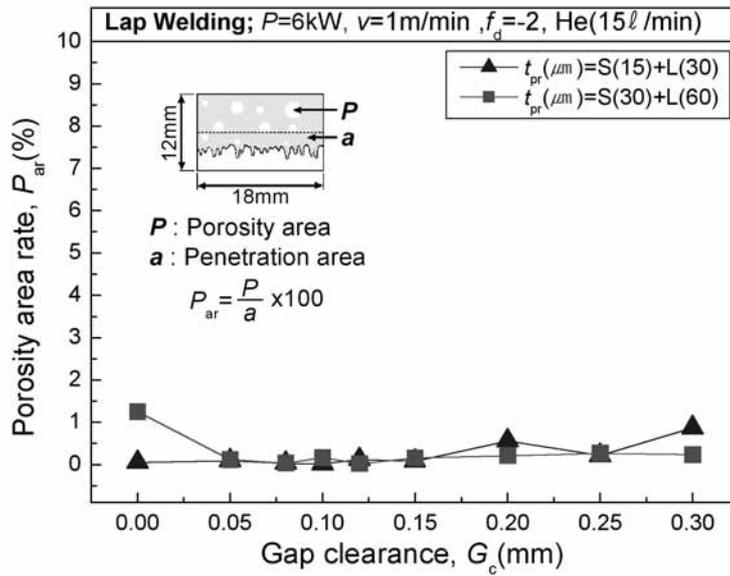
Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(30)+L(60)$ , He(15 l / min)			
$G_c$ (mm)	Weld bead	Trans. bead appearance	Defective position & shape
		Longi. section of bead	
0			
0.05			
0.10			

(b)  $t_{pr}(\mu m)=S(30)+L(60)$

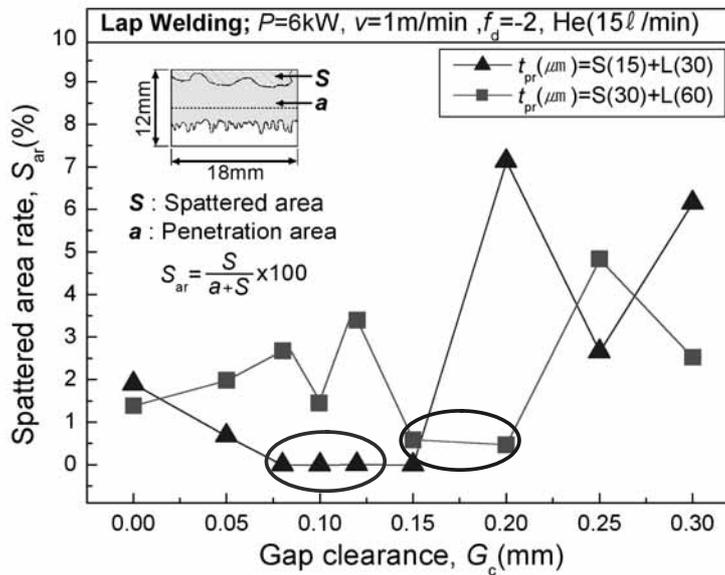
Fig. 4.33 To be continued

Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , $t_{pr}(\mu m)=S(30)+L(60)$ , He(15 $\ell$ / min)				
$G_c$ (mm)	Weld bead	Trans. bead	Bead appearance	Defective position & shape
		Longi. section of bead		
0.15				
0.20				
0.25				

Fig. 4.33 (b) To be continued



(a) Porosity area rate



(b) Spatter formation area rate

Fig. 4.34 Weld defects area rate as function of gap clearance

<b>Lap welding; <math>P=6kW</math>, <math>v=1m/min</math>, <math>f_d=-2</math>, He(<math>15\ell/min</math>)</b>					
$G_c$ (mm)	$t_{pr}$ ( $\mu m$ )	Weld bead	Trans. section and Surface appear of bead	Longi. section of bead	Weld defects
0	No coated				
0.08	S(15)+L(30)				
0.10					

Fig. 4.35 Effect of gap clearance on weldability( I )  
 $\langle t_{pr}(\mu m)=S(15)+L(30) \rangle$

Lap welding; $P=6kW$ , $v=1m/min$ , $f_d=-2$ , He(15 $\ell$ /min)					
$G_c$ (mm)	$t_{pr}$ ( $\mu m$ )	Weld bead	Trans. section and Surface appear of bead	Longi. section of bead	Weld defects
0	No coated				
0.15	S(30)+L(60)				
0.20					

Fig. 4.36 Effect of gap clearance on weldability(II)  
 $\langle t_{pr}(\mu m)=S(30)+L(60) \rangle$

### 4.3 용접금속부의 기공과 증발입자의 조성

용융금속 중에 생성되는 기공은 용액 속의 기공 외주부에 작용하는 합금원소의 비중과 표면장력의 과도적인 힘에도 붕괴되지 않고 용접금속 중에 잔존할 수 있다는 것은 그 내부가 어떠한 원인에 의해서 높은 압력으로 지탱되어 있음을 고려할 수 있다. 이러한 내부압력이 형성되는 메카니즘으로서는, 일반합금의 경우 합금원소의 급격한 증발현상에 기인한 기공의 불안정한 동적 거동에 크게 지배되며, 지금까지 기공의 거동에 대한 분석이 많이 진행되고 있다<sup>29~40)</sup>. 또한, 이것은 용접부의 불활성 실드가스의 채용조건에 따라서도 지대한 영향을 받게 된다<sup>41~42)</sup>.

본 실험에서는, primer코팅강판의 레이저 용접시 기공의 발생이 용이한 lap welding조건에서 얻어진 용접금속부를 강제 파단하여 노출된 기공과 조직의 조성에 대하여 분석하고, 용접조건에 따라 용접부로부터의 증발물질을 포집하여 그 성분을 분석함으로써 기공의 주된 형성 원인을 재료학적으로 규명하고자 하였다.

### 4.3.1 용접금속부의 강제파단에 의한 기공의 조성분석

Fig. 4.37은, lap welding한 30 $\mu$ m primer코팅강판의 lap접합부를 강제 파단시켜 노출된 용접금속내의 결함의 형상과 분포를 나타낸다. 용접 조건은, 최대출력 6kW, 용접속도 1m/min에서 gap간극은 별도로 두지 않았으며, 비초점거리( $f_d$ )는 4.1.1항의 기초데이터에 근거하여 -2mm로 하였다. 그림의 왼쪽은 lap접합부위의 상부측 시험편을, 그리고 오른쪽은 그 반대위치에 있는 하부측 시험편을 각각 나타내고 있는데, 조개 껍질을 벌려놓은 듯한 정반대의 형상을 보이고 있다. Lap부위에 상당히 많은 기공이 형성되어 있음을 알 수 있다. 왼쪽그림의 'I'영역에 대한 SEM사진을 Fig. 4.38(a)에 나타낸다. 그리고 동일한 그림에서 'I' 영역 내에서 존재하는 기공 A 및 B의 확대사진을 Fig. 4.38의 왼쪽에 각각 배치하고, 오른쪽에는 기공A의 파단된 정반대 위치에 있는 기공 형상('I'영역의 a)과 그 내벽에 다수 존재하는 개재물의 확대상을 각각 나타낸다. 기공내벽에는 다량의 개재물<(a)와(e)>이 부착해 있었으며 2000배로 확대한 B의 기공내벽에는 셀 상의 텐드라이트 응고조직도 관찰되고 있다. 그리고 Fig. 4.38(b)와 (d)는 하나의 기공을 파단시켜 양분한 것으로 그 형상이 매우 흥미롭다. 즉 이 기공은 열영향부로부터 무엇인가를 공급받아서 부풀려진 풍선과도 유사한 구조를 하고 있다.

Fig. 4.38(d)의 기공에 대한 EDX면분석한 결과를 Fig. 4.39에 나타낸다. (a)는 기공의 grey image를 나타내며, (b), (c) 및 (d)는 Fe, Zn 및 Si의 기공 내 성분변화를 나타낸다. 기공내벽의 전체에 걸쳐서 AH36의 주된 합금원소인 Fe원소가 다량으로 검출되는 가운데 primer성분인 Zn과 Si성분도 다수 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4.40에서 강제파단된 lap welding부의 덤플구조(dimple structure), 기공 내 벽면

및 기공 내 개재물의 EDX분석결과를 보면 기공의 내벽(inner surface)에도 Zn이 검출되며, 특히 기공내의 개재물에는 다소 개소별 차이는 있으나 Zn성분이 최대 85%에 이르고 있음을 알 수 있다. 그리고 'O'의 성분이 검출되어 있는 점으로부터 이들 원소들은 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4.40의 상부에 도시하듯이 기공이 아닌 용접금속부가 강제 파단된 딩플구조(Dimple structure)에서는 Zn성분이 전혀 검출되지 않았다. 이러한 결과는 primer코팅 강판의 레이저 용접시 기공의 발생원인은 주로 primer의 증발에 기인하고 있음을 간접적으로 입증하고 있는 것이다.

Fig. 4.41은, Fig. 4.37의 강제파단면인 'II'의 영역에 있어서 기공내벽(㉠부분)과 열영향부(㉡부분)의 EDX분석결과를 나타낸다. 기공내벽에는 소량의 Zn이 검출되고 있는 반면 열영향부 ㉡에서는 primer의 성분인 다량의 Zn과 Si가 검출되고 있음을 알 수 있으며, 특히 기공의 형상이 열영향부의 두 방향에서 풍선을 불어 부풀린 듯한 형상을 하고 있는 것으로부터 이러한 기공은 열영향부에서 다량의 primer가 증발 공급되어 이루어진 것임을 미루어 짐작할 수 있다.

열영향부와 용접금속에서 primer성분의 농도차이는 Fig. 4.42 및 Fig. 4.43의 용융경계면에서의 EDX면분석 결과로부터도 확인할 수 있다. 즉, 열영향부에서는 primer의 성분인 Zn과 Si가 다량으로 검출되고 있었다.

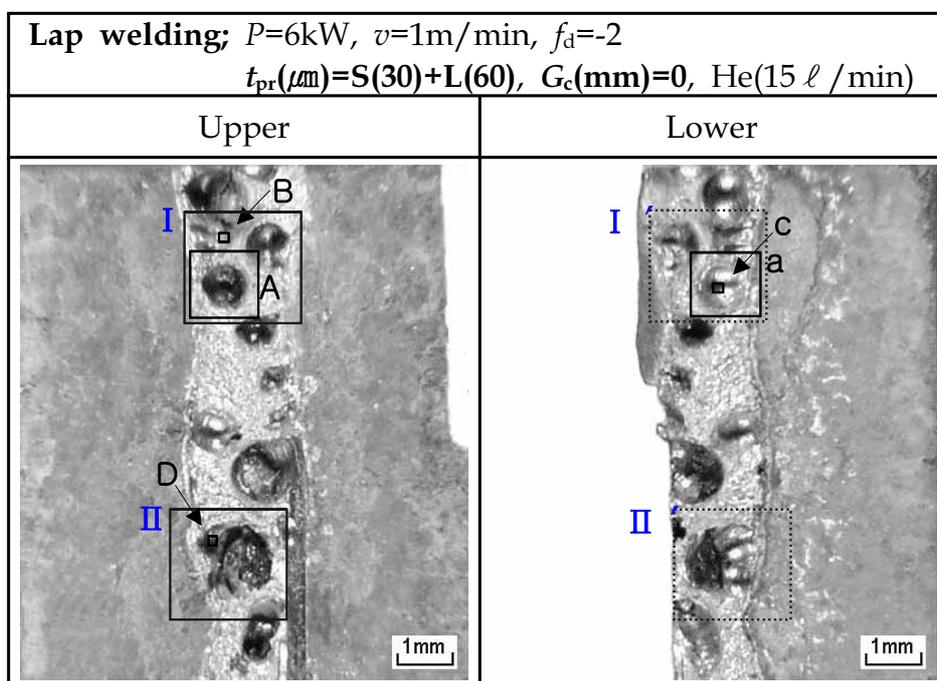


Fig. 4.37 Appearance of fractured weld metal in lap joint

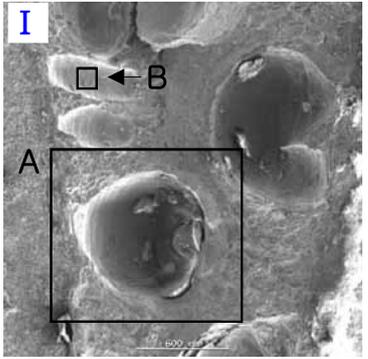
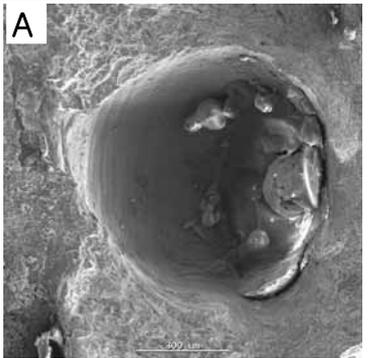
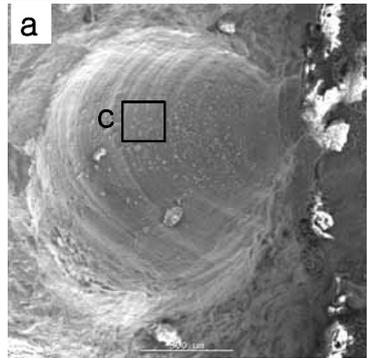
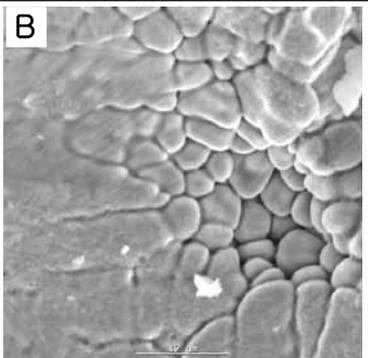
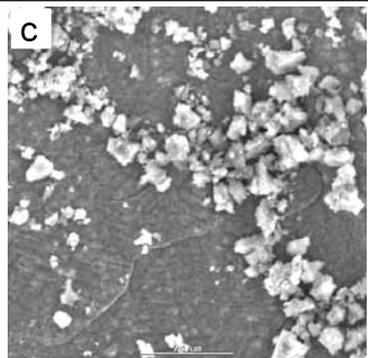
<p><b>Lap welding; <math>P=6\text{kW}</math>, <math>v=1\text{m/min}</math>, <math>f_d=-2</math>, <math>G_c(\text{mm})=0</math>,  <math>t_{pr}(\mu\text{m})=S(30)+L(60)</math>, He(15 <math>\ell</math> / min)</b></p>	
<p>SEM images of fractured surface</p>	
 <p>(a) X 40</p>	<p>Another side (lower side) of fractured porosity A ↓</p>
 <p>(b) X 80</p>	 <p>(d) X 80</p>
 <p>(c) X 2000</p>	 <p>(e) X 1000</p>

Fig. 4.38 SEM photographs for Surface of fractured weld metal in lap joint (refer to fig. 4.38)

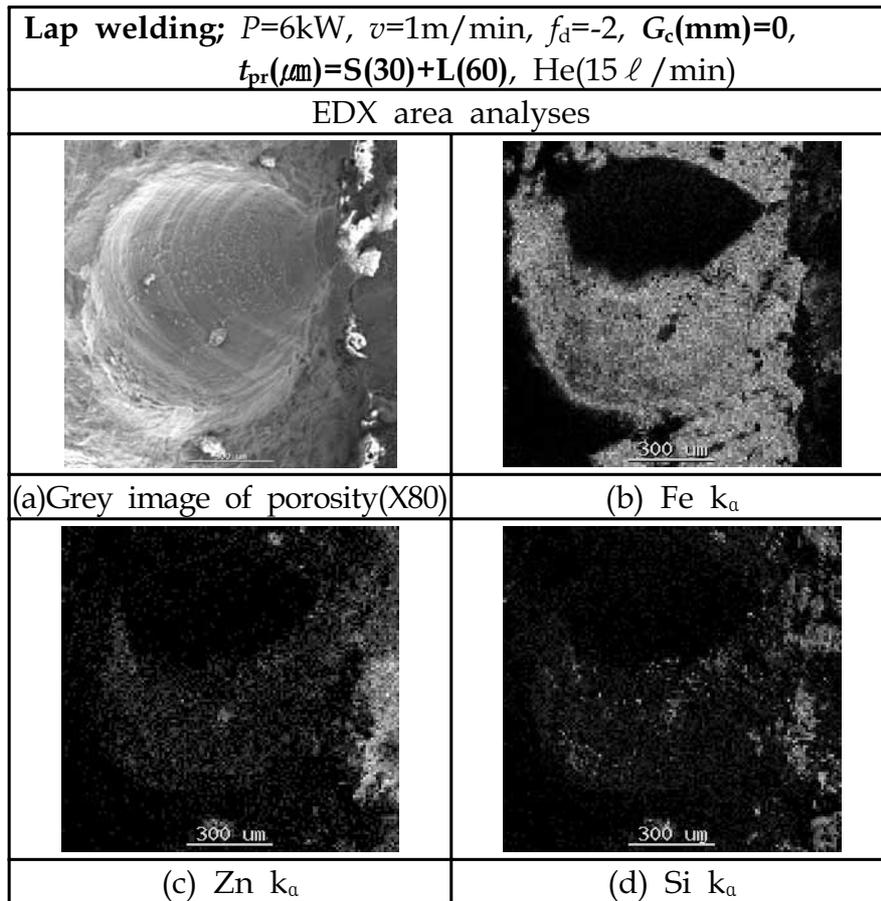


Fig. 4.39 Result of EDX area analyses in porosity(a) of lower side of lap joint <refer to fig. 4.39(d)>

Lap welding; $P=6\text{kW}$ , $v=1\text{m/min}$ , $f_d=-2$ $t_{pr}(\mu\text{m})=S(30)+L(60)$ , $G_c(\text{mm})=0$ , He(15 $\ell$ /min)				
EDX analyses of fractured surface				
Fractured area of dimple structure (No porosity)				
Inclusion of porosity (spot analysis)				
Element	Fe	Zn	Si	O
Inner surface of porosity	85.64	11.62	0.62	2.12
Inclusion of porosity	9.38	85.63	3.56	1.43

Fig. 4.40 Result of EDX analyses in dimple structure, inner surface and inclusion of porosity(Unit : wet%)

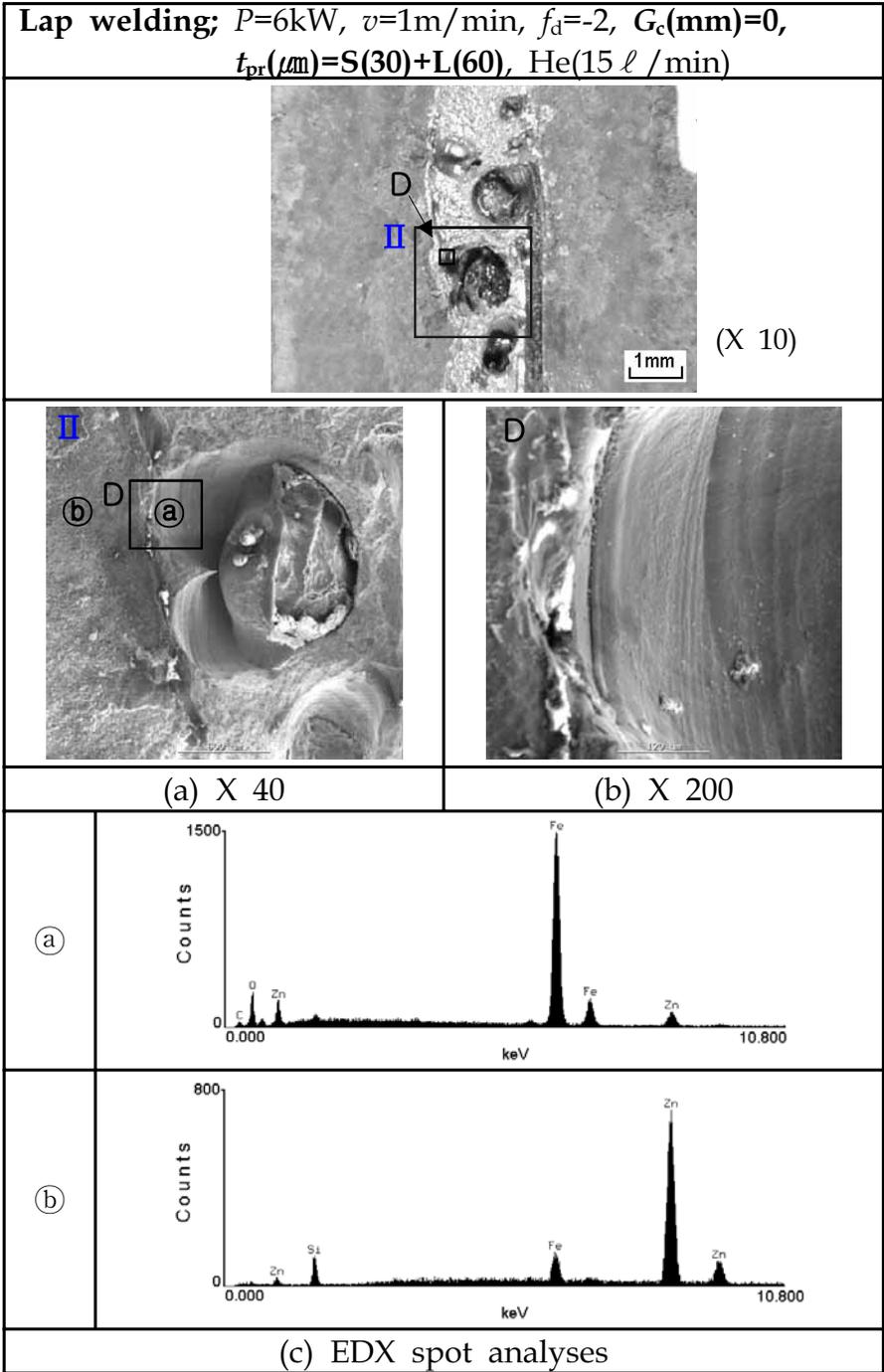


Fig. 4.41 SEM photographs and result of EDX analyses in inner surface of upper side of porosity(refer to fig. 4.38)

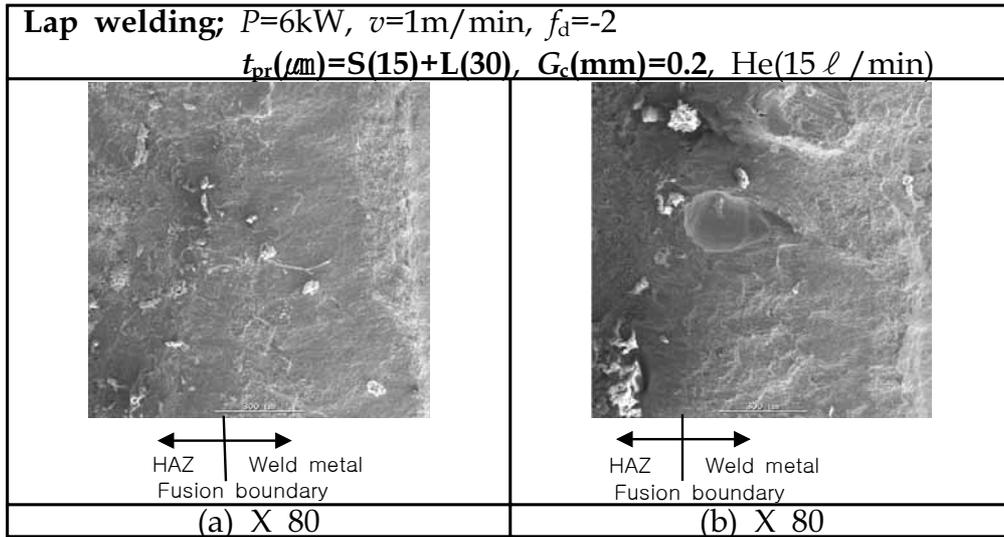


Fig. 4.42 Photographs of fusion boundary in fractured lap joint

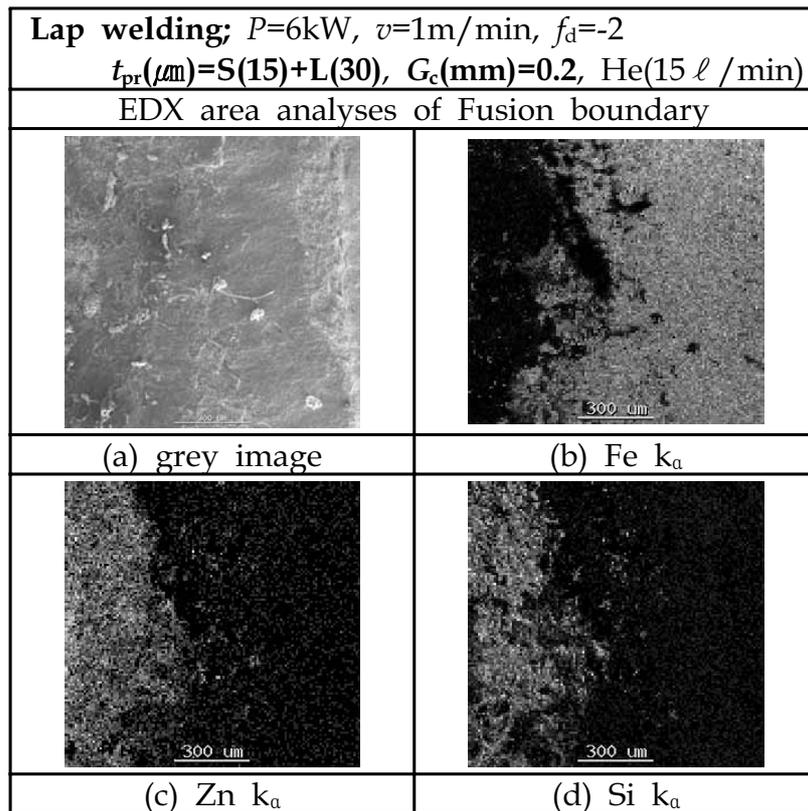


Fig. 4.43 Results of EDX area analyses in fusion boundary in fractured lap joint<fig. 4.43(a)>

### 4.3.2 비드표면에 형성되는 부유물질의 성분분석

레이저 용접시 비드표면에는 Fig. 4.44(a)의 ①과 ②에서 나타내듯이 연한 검은 색을 띤 부유물이 다수 발견되고 있는데, 본 항에서는 이러한 부유물질에 대한 성분조사를 통하여 그 발생원인과 비드형성과정에 어떠한 영향을 미칠 수 있을 지에 대하여 검토하였다.

Fig. 4.44의 비드외관에서 보듯이, 비드표면에 얼룩무늬 형태의 부유물인 ①과 ②가 관찰되며, 이러한 부유물질은 용융경계면인 비드엣지(edgy)부분을 따라서 비드 양쪽 방향에서 길게 형성되어 있다. 그리고 (b)그림에는 (a)의 A영역을 확대 표현한 SEM사진으로서 용융경계면에서의 비드외관을 나타낸다. 열영향부로 보여지는 변색부위가 모재와 용접금속사이에 일정면적을 가지며 비드를 따라 형성되어 있다.

①과 ②의 부유물에 대한 EDX분석결과를 Fig. 4.45에서 보여주고 있는데, 이 부유물질은 Zn성분과 관련성이 적은 여러 원소들과의 산화화합물인 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4.46에 표시된 ③의 열영향부에서 다량의 Zn성분이 검출되는 EDX분석결과와는 많은 대조를 이루고 있다.

이와 같은 결과로부터, 레이저 용접시에 비드상에 형성되는 부유물질은 primer의 주된 성분인 Zn과는 관련성이 적은 산화화합물이며, 이러한 반응생성물은 레이저에 의한 primer코팅강판의 용접이 아니더라도 일반 아크용접에서도 관찰되는 슬래그와 같은 유형의 산화물임을 확인하였으며, 레이저 용접성에 미치는 영향은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

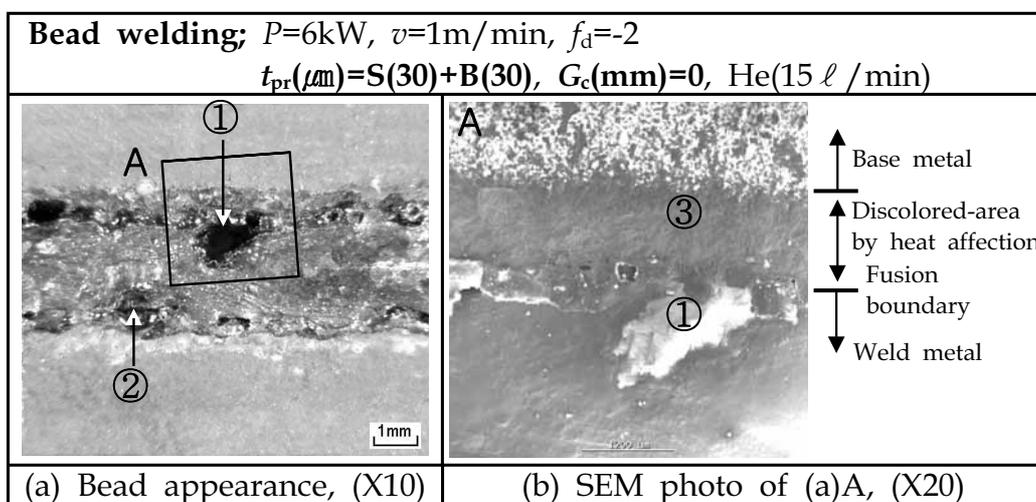


Fig. 4.44 Appearance of weld-bead surface during laser welding in primer-coated steel

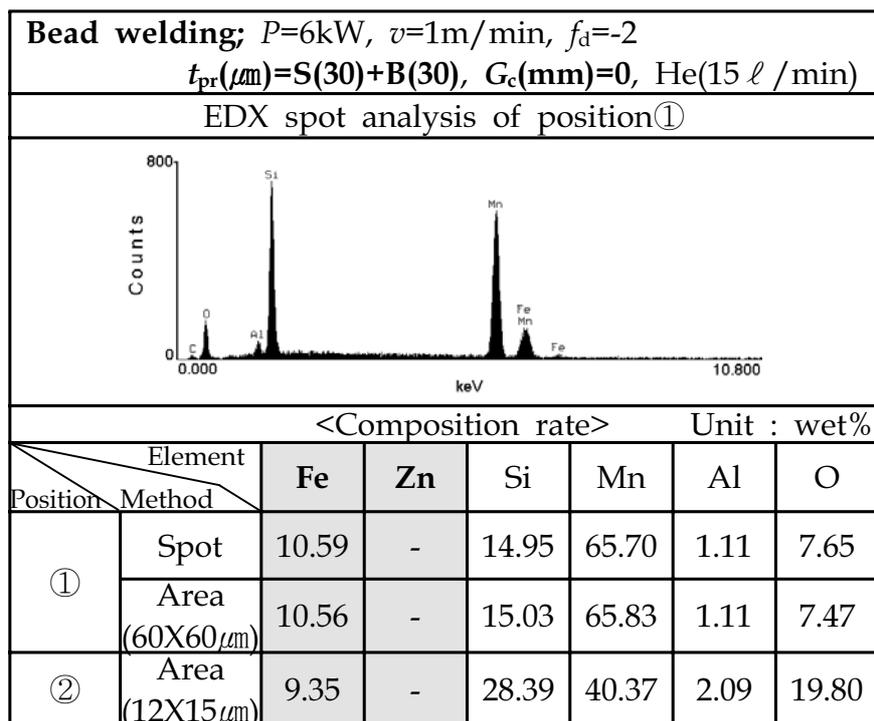


Fig. 4.45 Results of EDX analyses in suspended matter<①, ② of fig. 4.44(a)> on bead surface

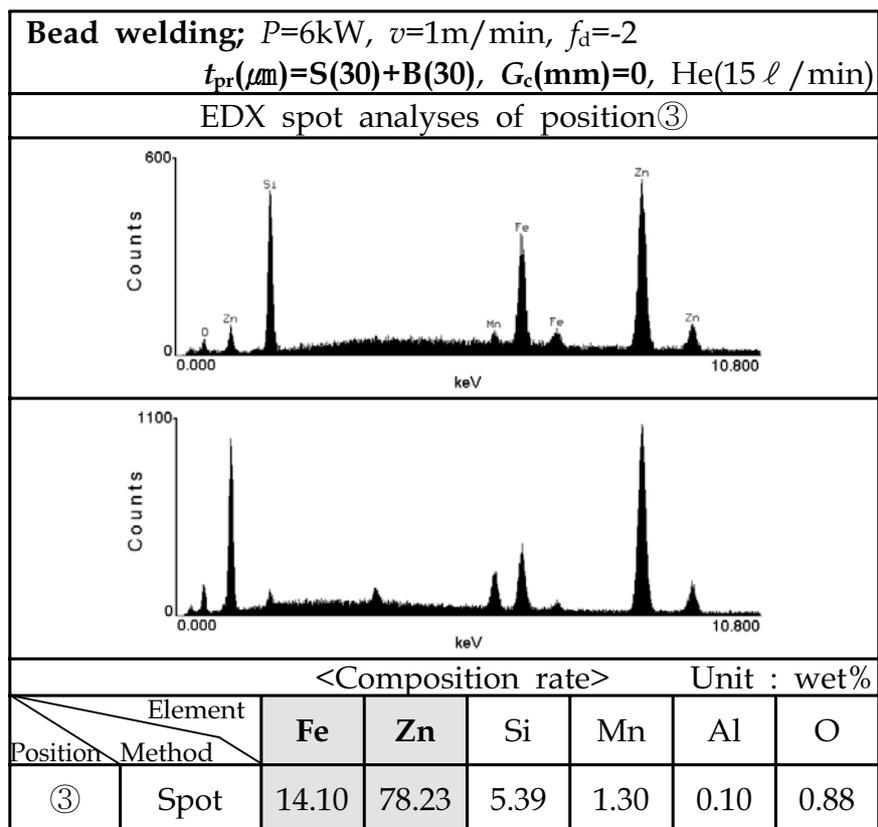


Fig. 4.46 Results of EDX analyses in discolord-area<③ of fig. 4.44(b)> of fusion boundary

### 4.3.3 증발입자의 조성분석

4.2절 4.2.2항의 실험결과에서, primer코팅강판의 lap welding시에는 primer코팅두께에 따라서 lap부위에 일정한 gap간극을 두는 것이 매우 유용함을 확인한 바 있으며 이것은 lap부위의 적절한 gap간극을 통하여 primer의 증발압력을 배출시켜 primer의 증발가스압이 용융금속내부로 침입하지 못하도록 함으로서 기공과 스패터의 발생을 저감 또는 억제할 수 있었다.

이러한 전술의 실험결과에 기초하여, primer코팅강판의 lap welding시 gap간극을 변화시킴에 따라 시험편 표면으로 증발하는 primer의 거동에도 많은 차이가 있을 것으로 사려되어, 본 항에서는 gap간극에 따른 primer증발량의 변화에 주목하고, 조건별 용접 중에 증발하는 입자를 채취하여 성분비를 비교·분석하였다.

Fig. 4.47은 gap간극( $G_c$ )을 두지 않았을 때와 0.2mm로 두었을 때 포집한 증발원소를 3000배로 확대한 SEM사진을 나타낸다. 사진에서도 알 수 있듯이, 포집된 기판의 색깔은 전자의 경우 옅은 회색을 띠고 있는데 반하여 후자의 gap간극을 0.2mm로 두었을 때는 포집된 증발입자의 색이 다소 짙은 검은색을 띠고 있으며 gap을 두지 않은 경우와는 차이가 있었다.

Fig. 4.48과 Fig. 4.49에 gap간극의 유무 및 크기에 따른 증발입자의 EDX분석결과를 각각 나타낸다. Fig. 4.48로부터, gap간극을 두지 않았을 경우 primer코팅 두께에 관계없이 포집된 증발원소의 조성비는 Zn이 약 70~90%를 점유하며 산화물을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그런데 Fig. 4.49의 결과에서는, gap간극을 0.2mm로 두게 될 경우 primer의 주성분인 Zn의 증발조성은  $15\mu\text{m}$ 표면코팅의 경우 약 35

wet%, 30 $\mu$ m코팅의 경우 약 50 wet%로 감소하고 있음을 확인하였다.

또한 lap부위를 제외한 표면에만 30 $\mu$ m코팅한 강판의 경우에도 gap간극을 0.08mm두께 되면 Zn의 증발조성은 약 55 wet%로 감소함도 확인하였다. 이러한 표면만의 코팅조건에서는 레이저 용접성에 미치는 primer의 증발영향이 미미하였음을 이미 설명한 바 있다.

이상의 결과로부터, primer코팅강판의 lap welding시 gap간극을 두께 됨으로서 시험편의 표면으로 증발하는 합금원소 및 primer의 조성 비율은 달랐으며 이것은 lap부위에 적절한 gap간극을 인위적으로 두께 됨으로서 primer의 증발압력이 gap간극을 통하여 일부 배출되어 용접 금속에 미치는 영향이 적게 되는 것을 간접적으로 입증하는 것이다.

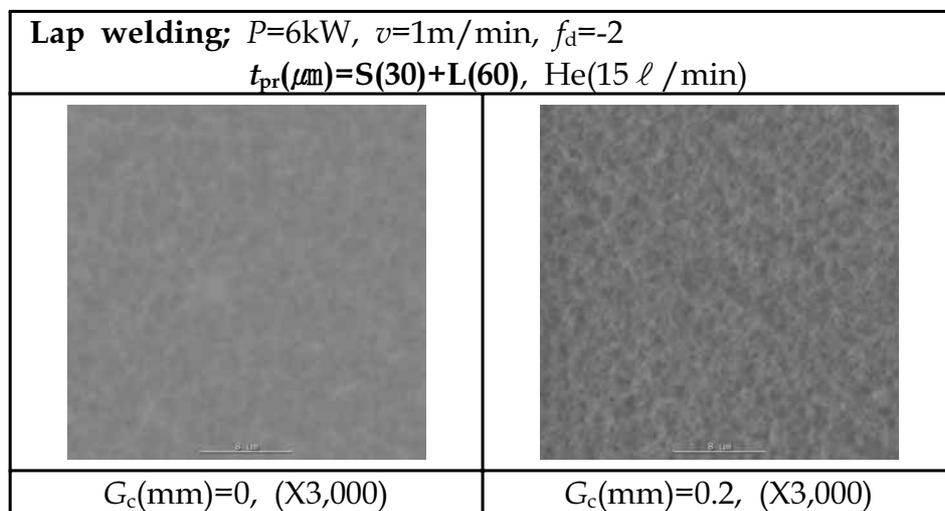


Fig. 4.47 SEM photographs of vaporizing particles during CO<sub>2</sub> laser lap welding in He gas

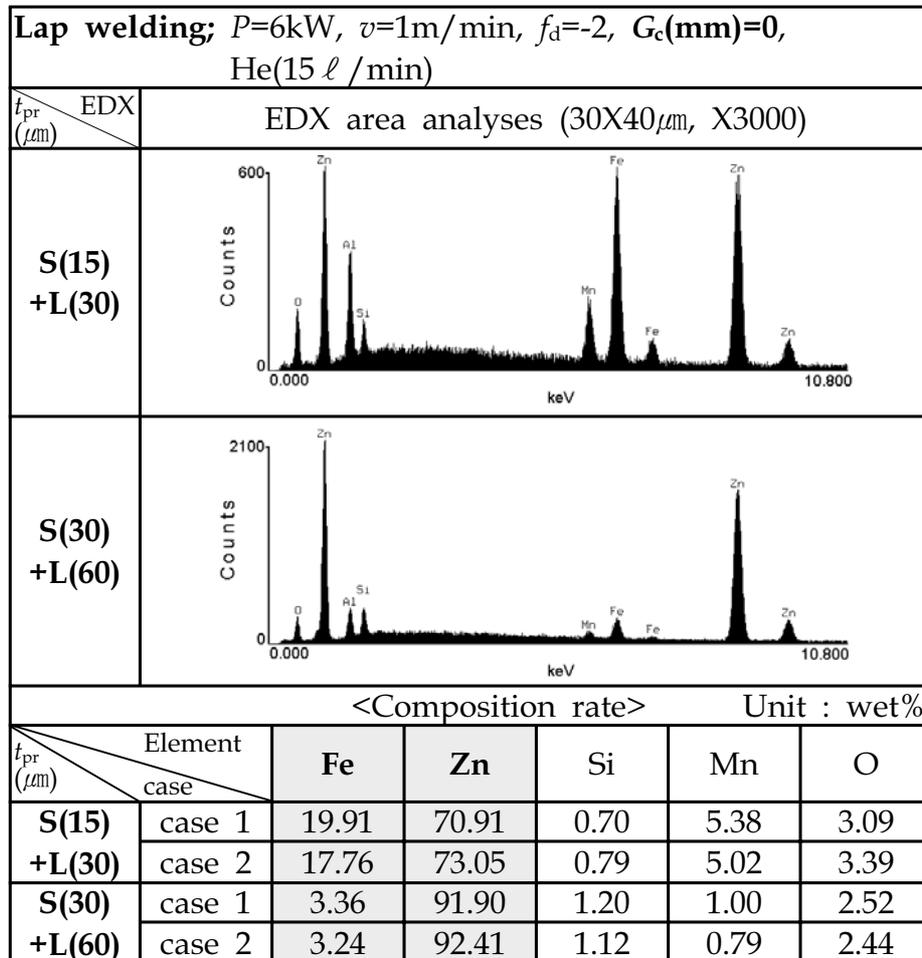


Fig. 4.48 Results of EDX analyses in vaporizing particles by primer-coated thickness in case of no gap during lap welding

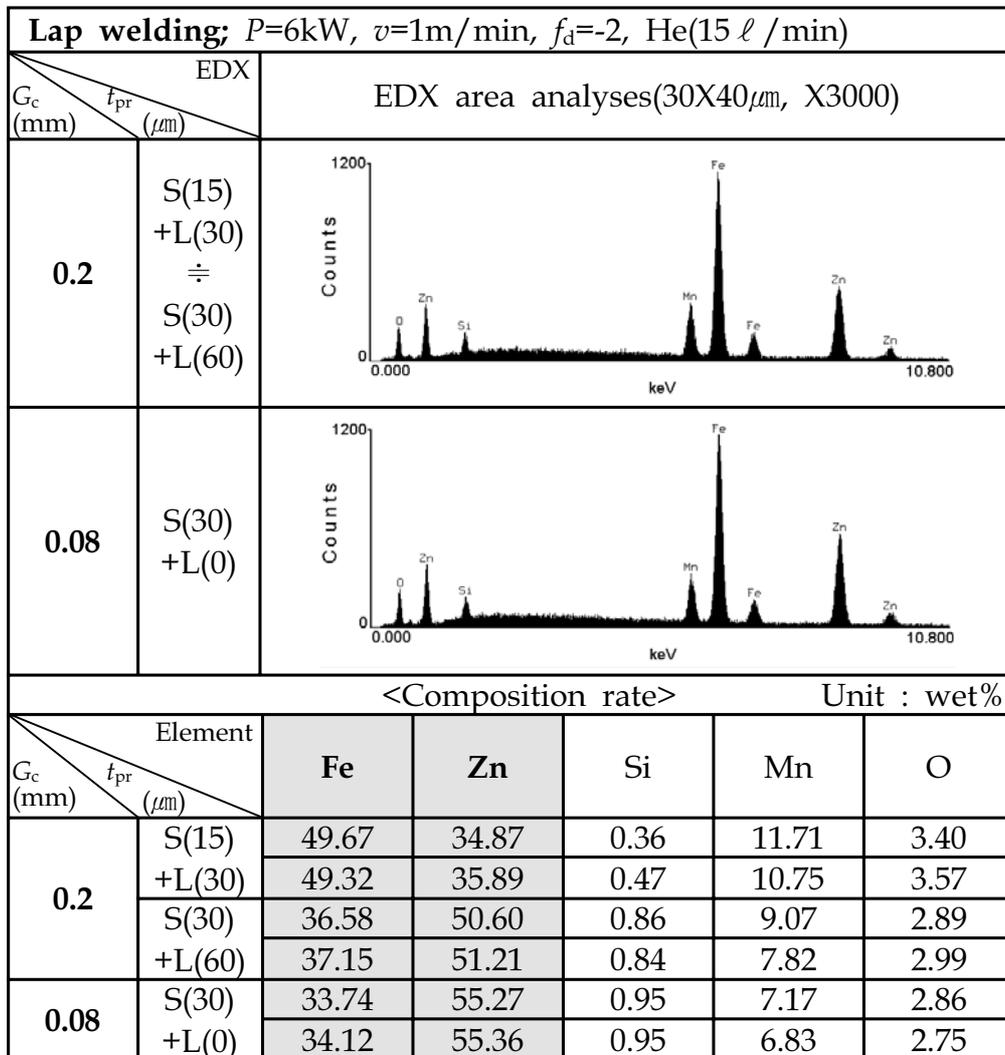
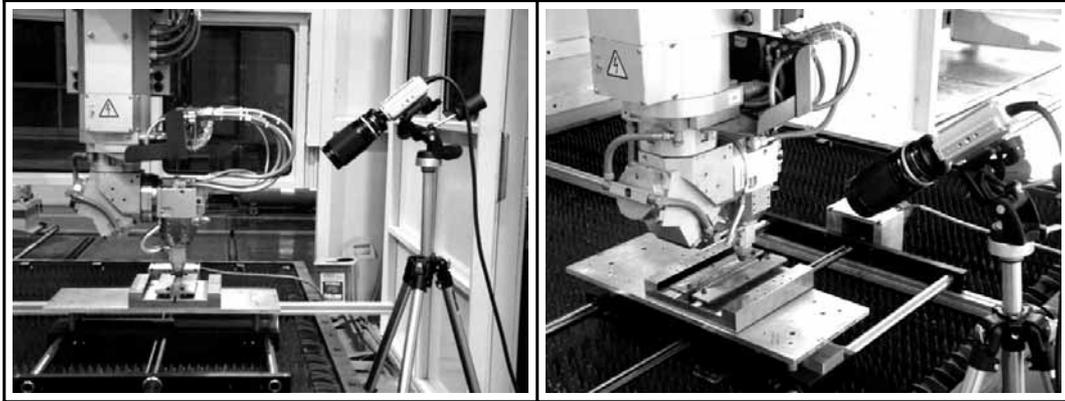


Fig. 4.49 Results of EDX analyses in vaporizing particles by primer-coated thickness in case of setting gap during lap welding

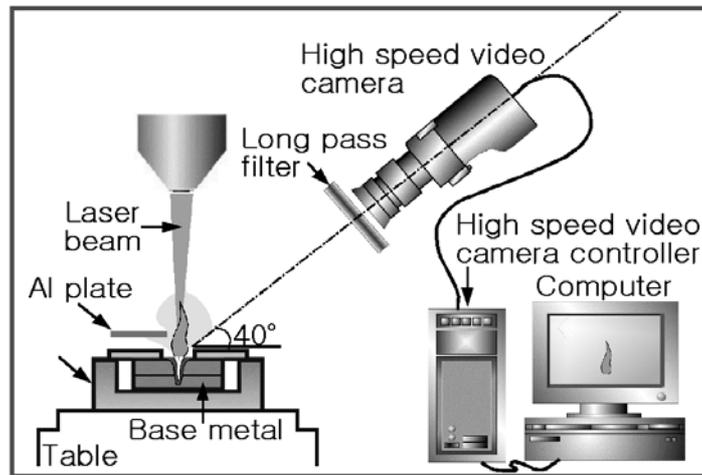
## 4.4 레이저 용접현상의 고속도 계측

### 4.4.1 고속도 비디오 카메라를 이용한 용접현상의 계측방법

Primer코팅 강판의 레이저 용접시 재료 표면에 발생하는 유기 플라즈마와 스파터의 동적 거동을 고속도 카메라에 의해 가시화 하여 관찰하였다. Fig. 4.50에 그 계측 시스템의 실제 사진과 모식도를 나타낸다. 본 계측에 이용한 고속도 카메라는 Digital color CCD sensor's scanning type을 채용하고 있으며, 최고 촬영속도는 10,000 FPS, 이때의 최소 shutter time은  $50\mu\text{m}$ 이다. 레이저 용접현상의 계측시의 각도는  $40^\circ$ 로 하여 유기플라즈마의 동적 거동과 용융지로부터 비산하는 스파터의 거동을 동시에 관찰하고자 하였다. 특히 스파터의 거동을 관찰할 때에는 비산하는 용융액의 반사광이 적외광임을 고려하여 계측에 방해가 되는 가시영역 및 자외영역의 플라즈마 스펙트럼을 차단할 수 있는 적외 전용 long pass filter를 사용하였다.



(a) Experimental setup



(b) schematic experimental setup

Fig. 4.50 Observation system of laser-induced plasma and spatter

#### 4.4.2 Gap간극의 유무에 따른 유기플라즈마와 스패터의 동적 거동

4.2절의 실험 결과에서는, primer코팅 강판의 lap welding시 lap 부위에 코팅된 primer의 증발에 기인하여 기공과 스패터가 발생하며, 적절한 gap간극을 유지함으로써 건전한 비드를 얻을 수 있었다. 이 실험에서는 레이저 조사시에 유기하는 플라즈마의 거동을 관찰함으로써 키홀의 거동을 추정하고 스패터에 의한 비드결함 형성과의 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<sup>43~48</sup>). 따라서 용융금속 내의 상황을 반영하는 플라즈마와 스패터의 발생거동을 가시화 하여 관찰함으로써 용접결함의 발생여부 및 그 정도를 예상할 수 있다<sup>29</sup>).

##### (1) Primer코팅의 영향

Primer코팅강판의 lap welding시 스패터가 다량으로 발생하여 humping비드가 형성되어 있는 비드형상을 Fig. 4.51에 나타내고, 그때의 유기플라즈마 및 스패터의 비산거동을 Fig. 4.52에 나타낸다. Fig. 4.51의 결과에서, 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 동적 거동에 대한 고속도 계측결과로부터 알 수 있듯이 유기플라즈마가 키홀로부터 시험편의

표면으로 분출하듯이 팽창 또는 성장할 때 키홀 주변에 형성되어 있는 용액을 같이 들어올려 스파터를 비산시키게 되는데, 이때 키홀주변으로부터 비산되는 스파터는 다량으로 분출되어 용접진행방향의 반대측으로 뿌려지듯이 흘러 보내게 된다. 그 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 스파터 현상을 억제 또는 방지하여 건전한 용접결과를 얻게 되는 과정에서 플라즈마의 거동을 계측하였다. Primer 코팅강판에 대하여 gap간극( $G_c$ )을 0.15mm로 하였을 때 얻어진 용접금속의 비드형상 및 유기플라즈마와 스파터의 비산거동을 Fig. 4.53 및 Fig. 4.54에 나타내었다.

Gap간극을 두지 않을 때의 결과와 비교하여 상당히 안정된 용접비드를 보이고 있으며 이러한 현상은 용접 중 유기 플라즈마와 스파터의 거동에도 잘 반영되어 있다. 즉, 유기플라즈마의 격렬한 움직임은 다소 완화되었고 스파터의 비산현상도 다수 관찰되기는 하나 gap을 두지 않은 경우에 비하여 매우 안정된 플라즈마의 거동을 관찰할 수 있었다. 특히,  $G_c=0.15$ 인 경우 동일한 코팅조건에 대해서는 가장 건전한 용접비드를 얻을 수 있었으며 이 때의 고속도 계측 결과에서도 상당히 안정된 거동을 보였다.

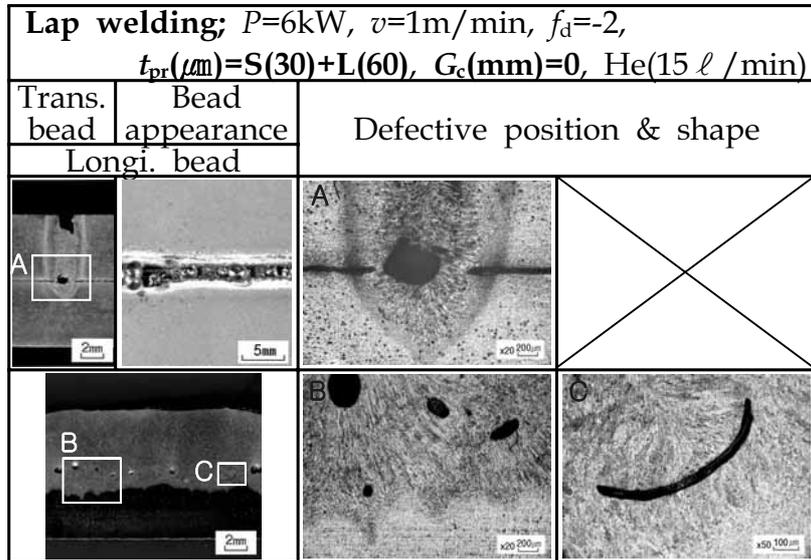


Fig. 4.51 Weld defects in lap welding of primer-coated steel by no gap

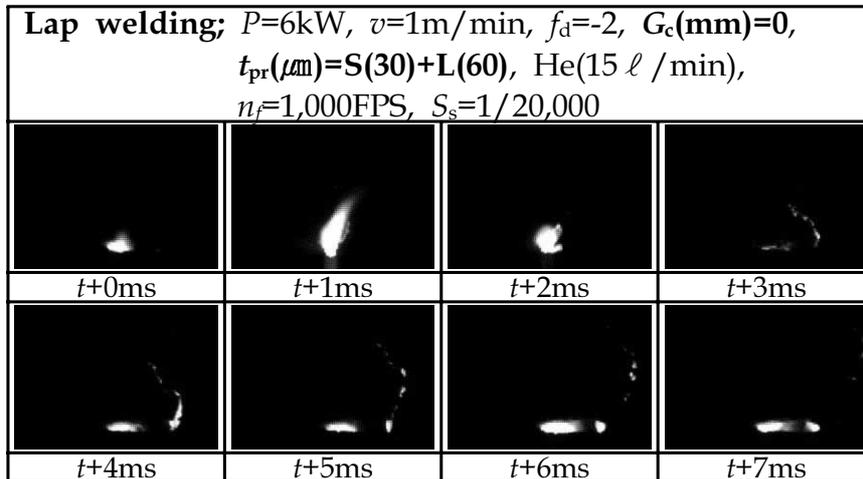


Fig. 4.52 High speed photos of laser-induced plasma and spatter in lap welding of primer-coated steel by no gap

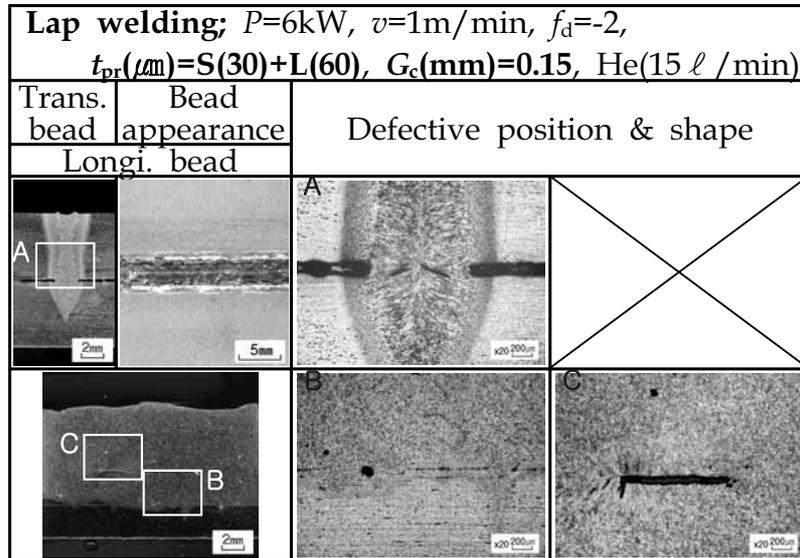


Fig. 4-53 Weld defects in lap welding of primer-coated steel by gap clearance

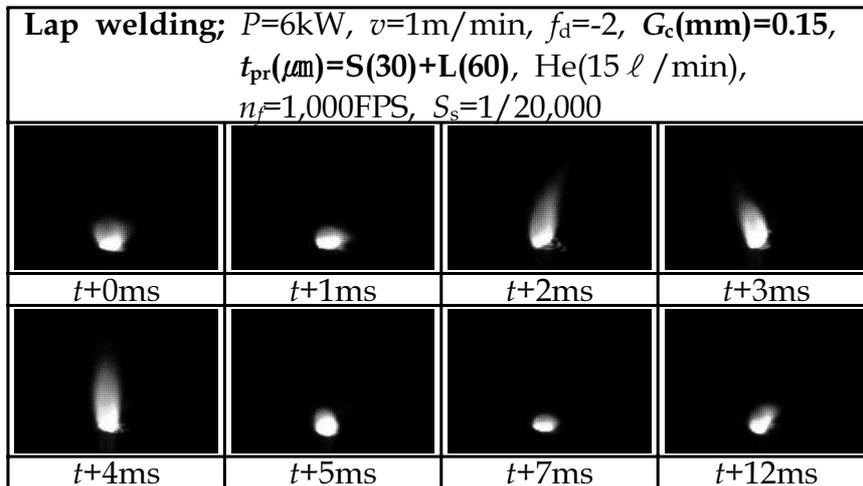


Fig. 4-54 High speed photos of laser-induced plasma and spatter in lap welding of primer-coated steel by gap clearance

#### 4.5 기공 및 스패터의 발생 메카니즘과 억제방법

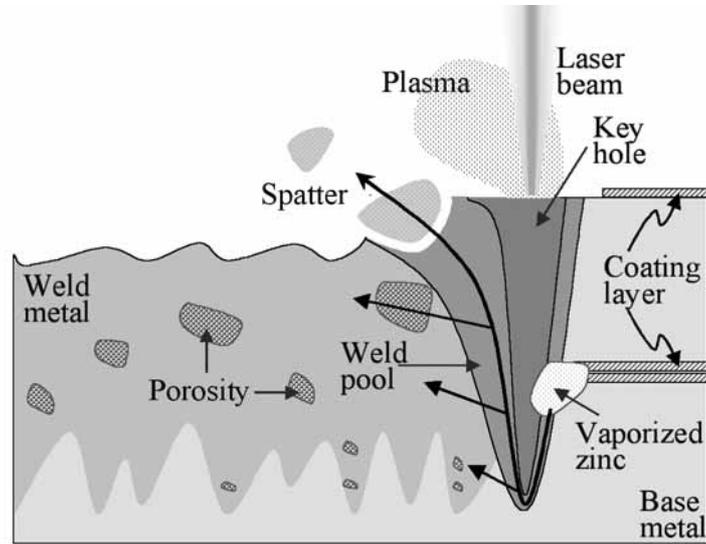
지금까지의 실험결과에 근거하여 레이저 용접성에 미치는 primer코팅강판의 primer증발 메카니즘에 대하여 정리하면 Fig. 4.55(a), (b)의 모식도로서 설명 가능할 것으로 사려된다. 즉, Fig. 4.55(a)는 lap부위에 코팅된 primer의 증발에 기인하여 스패터 및 기공이 발생하는 메카니즘을 설명하고 있으며 Fig. 4.55(b)는 lap부위에 적절한 gap간극을 둘 경우 건전한 용접결과를 얻을 수 있었던 메카니즘을 설명하고 있다.

Fig. 4.55(a)에서 알 수 있듯이, Fe의 용점보다 낮은 비점을 가진 Zn 성분이 lap부위로부터 다량으로 증발하여 좁은 기홀을 통로로 하여 급속히 빠져 나옴으로서 스패터가 비산하게 되며 그 결과 humping비드가 형성된다. 또한 증발원소와 불안정한 기홀의 거동에 의해 형성된 bubble은 형성되기도 하며, 레이저빔이 지나간 이후에도 비점이 낮은 primer는 잔류열 만에 의하여도 bubble의 성장은 계속된다. 용접속도가 저속일 경우 입열량이 많기 때문에 생성된 bubble이 부상하여 소실되기 위한 시간적·공간적 조건이 충분하게 되어 기공의 발생이 억제될 수 있다. 그러나 고속용접의 경우, 용접진행방향의 전면 lap부위로부터 증발로 인한 primer의 공급이 이루어지는 가운데 시험편 내부에 형성되는 기홀은 좁고 상대적으로 용융부는 적게 되어 기홀을 통로로 하여 빠져나옴으로서 스패터가 발생하며 용접금속내부에는 humping비드가 생성된다. 용융액 내에 발생된 bubble이 부상도중 응고벽에 트랩되면 기공으로서 잔류하게 되는 것이다.

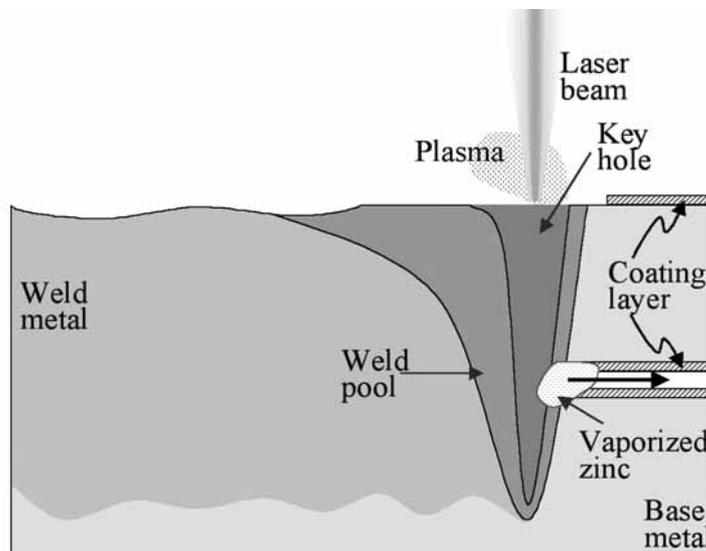
이러한 primer의 증발에 기인한 기공과 스패터의 발생을 억제하기 위하여 Fig. 4.55(b)와 같이 gap간극을 두게 됨으로서 lap부위에서의 폭발적 증발현상을 gap간극을 통하여 누출시키고 용융금속내부로 증발압

력이 미치지 못하도록 하게 함으로서 스파터에 의한 humping과 기공이 없는 건전한 용접결과를 얻을 수 있는 메카니즘을 고려할 수 있다.

즉, 기공과 스파터의 발생을 억제하기 위해서는 합금원소 또는 primer의 급격한 증발압력을 최소화하여야 한다. 그 방법으로 primer코팅량에 따라 적절한 gap간극을 두는 것 외에 집광광학계의 비초점거리를 선정하여 에너지 밀도를 줄이는 방법, lap부위의 primer코팅량을 최소화하거나 용접전 primer코팅부위를 제거하는 방법 등을 들 수 있다. 또한, 레이저빔을 변조펄스화 하여 입열량을 줄임으로서 primer의 증발량을 최소화하는 방법도 고려할 수 있다.



(a) Schematic of weld defects formation



(b) Effect of gap clearance

Fig. 4.55 Formation mechanism of weld defects by Zn and gap-effect in lap welding on primer coated steels

## 5. 결 론

조선용 AH36 primer코팅강판(6mm<sup>t</sup>)의 CO<sub>2</sub> CW 레이저 용접시 각종 형상인자 및 primer의 코팅조건에 따른 용접특성을 평가하고, lap welding시 primer성분의 증발에 기인하여 발생하는 기공 및 스패터의 발생 메카니즘과 gap간극을 통한 용접결함 억제법에 관하여 실험한 결과를 다음에 정리한다.

- (1) 집광빔에 의한 재료의 용접특성을 검토하기 위해 비코팅 강판을 이용하여 용접한 결과 양(+)과 음(-)의 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용입깊이는 얕아지며 비드폭은 다소 넓어졌다. 이것은 비초점거리의 변화가 커짐에 따라 단위면적당 에너지 밀도가 낮아지는데 기인한 결과이다.
- (2) 시험편이 비코팅 된 경우 및 15와 30 $\mu$ m의 primer코팅 조건에 대하여 용접속도( $v$ )를 변화시켜 bead welding 및 butt welding을 행한 결과 용접속도( $v$ )가 증가함에 따라 용입깊이는 얕아지며 비드폭도 감소하였다. 또한 코팅두께가 증가할수록 primer의 증발에 기인하여 시험편 표면에 도달하는 에너지가 감소함에 따라 용입깊이는 얕아지며 비드폭은 넓어지는 경향을 보였다. Butt welding시에는 primer가 코팅된 경우에도 완전용입조건에서는 기공 등의 용접결함이 없는 건전한 용접비드가 얻어졌다.

- (3) Lap welding시 용입깊이와 비드폭의 변화는 bead welding의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 키홀의 하부 선단이 lap부위에 닿을 정도의 용접속도에서는 lap부위로부터 primer증발 압력이 유입되어 다량의 기공과 스파터가 발생하였으며 코팅두께가 증가할수록 그 경향은 현저하게 나타났다.
- (4) Lap welding시 코팅위치(표면, lap부위, 표면과 lap부위)와 코팅두께(15 $\mu$ m와 30 $\mu$ m)를 변화시켜 실험한 결과, 표면보다는 lap부위의 코팅조건에서 그 양이 증가함에 따라 스파터와 기공이 다량으로 발생하였으며, 양측 모두 코팅된 경우는 그 발생정도가 더욱 심해졌다. 즉 lap부위에 코팅된 primer는 용접결함 발생에 지배적인 역할을 하였다.
- (5) Lap welding시 코팅두께가 S(15)+L(30)일 때는 0.08과 0.10mm, S(30)+L(60)일 때는 0.15와 0.20mm의 gap간극을 두었을 때 양호한 용접결과를 얻었다. 이것은 primer의 코팅두께에 따라 용접시의 증발량을 고려하여 적절한 gap간극을 유지함으로써 primer의 증발압력을 방출시켜 용융금속 내로의 유입을 방지한 결과이다.
- (6) 기공내벽의 조성을 분석한 결과 Fe성분과 함께 primer의 성분인 Zn도 다수 검출되었으며, 특히 기공내의 개재물에는 많은 Zn성분이 검출되었다. 또한 기공이 열영향부로부터 부풀린 듯한 형상을 하고 있는 것으로부터 기공의 주된 발생원인은 primer의 증발에 기인한 것임을 확인하였다.

- (7) 레이저 용접시에 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. 반면, 비드 표면에 형성되는 부유물질은 Zn성분과 관련성이 적은 산화화합물이며 레이저 용접성에 미치는 영향은 적은 것으로 판단되었다.
- (8) Primer 코팅강판의 laser welding시 유기플라즈마의 거동을 관찰한 결과, lap welding시  $G_c=0$ 인 경우에는 primer의 급속한 증발에 의해 용융지로부터 용액의 비산을 초래하였다. 그러나 primer의 코팅 두께에 따라 적절한 gap간극을 유지한 경우에는 비교적 안정된 플라즈마의 거동을 보였으며 용액의 비산현상도 감소하였다.
- (9) 비산현상에 의한 스패터의 발생 메카니즘은 키흐내의 증발압력에 의하여 플라즈마가 표면위로 분출할 때 같이 들어올려진 주위의 용액 일부가 팽창된 증발압력에 의하여 이탈하게 되고 용접진행방향의 후반으로 뿌러지듯이 흩어지게된다. 그 결과 비드 표면에는 심한 humping비드가 형성된다.
- (10) 기공의 형성 메카니즘은 키흐가 재료내부에 형성되어 진행하게 될 때 키흐 전방에 위치한 lap부위로부터 증발한 primer가 키흐에 함입되면서 키흐를 통하여 소실되기도 하며, 소실되는 가운데 키흐를 부풀리게 하여 불완전한 동적 거동을 가속화시키게 된다. 이때 키흐로부터 분리된 bubble이 응고벽에 트랩되면 기공으로 잔류하게 된다.

(11) Primer의 증발압력을 최소화하여 용접결함발생을 억제시키는 방법에는 gap을 두어 증발압력을 누출시키는 방법, 초점거리를 비초점으로 하여 에너지밀도를 줄이는 방법, lap부위의 primer코팅량을 최소화하거나 제거하는 방법, 레이저빔을 변조펄스화하여 입열량을 줄이는 방법 등을 고려할 수 있다.

(12) 이상의 결과를 통하여 primer코팅강판의 laser welding시 primer의 증발에 기인한 기공, 스파터 등 용접결함의 형성 메카니즘을 확인하였으며, gap간극을 통한 그 억제 방안을 제시하였다. 국내 조선업계에서 해양부식환경에 적합한 primer코팅강판을 적용할 때 보다 우수한 용접부를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 비점이 낮은 원소성분의 증발에 기인한 결함의 형성기구는 향후 강판의 코팅기술이 발전과 더불어 그 연구 범위가 확대될 것으로 생각한다.

## 참고문헌

1. 新美 友治, 夏見 文章 : CO<sub>2</sub> 레이저 용접의 자동차 보디에어への應用, 第28 레이저 열처리 연구 논문집(1992)
2. 丸山 磐男 : ホンダに於ける 레이저 가공 적용例의紹介,
3. 泰山 正則, 高橋 通泰, 福井 清之, 山本 剛 : 自動車用表面處理鋼板의重ね合わせ 레이저 용접부의耐食性及び諸特性, 第147회 용접冶金資料, 第157회 용접법資料, 第24회 고에너지빔資料(1997)
4. G. Marinoni, A. Maccagno, E. Rabino : Technical and Economic Comparison of Laser Technology with the Conventional Technologies for Welding, Proc. 6th Int. Congr. Lasers in Manufacturing, (1989), 105-120
5. Young Whan Park, Hyunsung Park, Sehun Rhee : A Study of Quality Monitoring System for Process Automation During Laser Tailored Brank Welding, IWC, (2002), 606-611
6. 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
7. 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
8. 김종도, 김영식 : 레이저 용접 품질 검사시스템의 현황, 大韓熔接學會誌 第18卷 第4號 別冊, (2000), 433-440

9. PA Hilton : ND:YAG and CO<sub>2</sub> Laser Welding of Complex Geometries, ICAEO(2002)
10. S. P. Edwardson, K. G. Watkins, G. Dearden, J. Magee : Generation of 3D Shapes Using a Laser Forming Technique, ICAEO(2002)
11. N. C. Sekhar, J. D. Russell, N. A. McPherson : Autogenous ND:YAG Laser Welding of 6mm Thick Dissimilar Steels, ICAEO(2002)
12. Hongping Gu, Robert Mueller : Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheet, ICAEO(2002)
13. G. S. Booth, D. S. Howse, A. C. Woloszyn, E. D. Howord : Applying Laser-arc Hybrid Welding Technology for Land Pipelines, IWC, (2002), 169-175
14. Ulrich Dilthey, Hanno Keller : Laser arc hybrid welding, IWC, (2002), 162-168
15. 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
16. Noboru Kiji, Katsura Ohwaki, Kazuyuki Tsuchiya, Norihiko Katayama, Hirotaka Kanazawa, Toshio Kojima : Development of Underwater Welding with High Power YAG Laser, IIW Doc. IV, (1996)
17. 佐野 雄二, 小長井主税 : レーザお使用した水中加工技術, 日本工業出版(光アライアンス)第6巻第9号, (1995), 19-21

18. 小沼 勉, 舟本李雄, 石川 文紀, 小沼 昭, 中材満夫, 玉井康方, 小出 宏夫 : 水中YAGレーザーによるイテレス鋼の表面溶融処理, 第24回高エネルギービーム加工研究委員会 No.HEB-164-97, (1997)
19. Martin Dahmen, R. Laitinen, D. Porter, S. Kaierle, R. Poprawe : Comparative Study on the Weldability of Different Shipbuilding Steel, IWC, (2002), 222-228
20. Hongping Gu : A New Method of Laser Lap Welding of Zinc-coated Steel Sheet, ICALEO(2000), 1-6
21. R. Akhter, M.M.Gualini : Mathematical Modeling of the Laser Spot Welding of Zinc Coated Steel in Lap Configuration, ICALEO(1998), 207-216
22. J. Heyden, K. Nilsson and C. Magnusson : Laser Welding of Zinc Coated Steel, Proc. 6th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, (1989), 93-104
23. Y. F. Tzeng : Pulsed ND:YAG Laser Seam Welding of Zinc-coated Steel, Welding Research Supplement, (1999), 238-244
24. M. M. S. Gualini : Laser Welding of Zinc Coated Steels. An Old Problem with a Possible Solution, ICALEO, (2002)
25. Katayama Seiji, Wu Yushen, Matsunawa Akira : Laser Weldability of Zinc-coated Steels, ICALEO(2002)
26. 中村一郎 : 鋼構造物の溶融亜鉛めっき, 表面技術, Vol. 42. No2, (1991), 186-192
27. 黒澤 進 : 溶融亜鉛めっき鋼板の表面分析, 表面技術, Vol. 45. No3, (1994), 234-238

28. Tommi Jokinen, Jari Hovikorpi, Antti Salminen, Veli. Kujanpaa :  
The Effect of an Air Gap on the Properties of High Power  
ND:YAG Laser Welds, ICALEO(1998), 103-112
29. 김종도 : 레이저 용접시 용접결합의 실시간 모니터링법 개발에 관  
한 연구, 大韓熔接學會誌 第20卷 第1號 別冊, (2002), 26-33
30. S. Tsukamoto, I. Kawaguchi, G. Arakane, T. Kamata & K.  
Maekawa : Suppression of Welding Defects in Deep Penetration  
CO<sub>2</sub> Laser Welding, ICALEO(2000), 7-15
31. Y. MASUHIRO, Y. INABA and T. OHJI : Mathematical  
Modeling of Molten Pool in Laser Welding, Proceedings of LAMP  
1992, Nagaoka(June, 1992), 381-384
32. J. Dowdn, R. Ducharme, P. Kapadia and A. Clucas : A  
Mathematical Model for the Penetration Depth in Welding with  
Continuous CO<sub>2</sub> Laser, ICALEO(1994), 451-460
33. 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 CO<sub>2</sub> Laser,  
ICALEO(1993), 97-105
34. 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 CO<sub>2</sub> Laser Welding,  
ICALEO(2002)
35. Takuomi MAIWA. Isamu MIYAMOTO and Kiyokazu MORI, :  
Properties of Keyhole Plasma in CO<sub>2</sub> Laser Welding, ICALEO'95,

- Laser Institute of America, (1995), 708-717
36. E. A. Metzbower : Absorption in the Keyhole, ICALEO'97, (1997), Section G 16-25
  37. 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
  38. 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
  39. Min Hyun Cho, Dave Farson : Control of Laser Weld Keyhole Dynamics by Power Modulation, IWC, (2002), 600-605
  40. Jae Y. Lee, Sung H. Ko, Choong D. Yoo : Mechanism of Keyhole Formation and Stationary Laser Welding, IWC, (2002), 644-649
  41. Hui Gong, Flemming O. Olsen : Assisting Gas Optimization in CO<sub>2</sub> Laser Welding, JWS, Proc. of the 6th Int. Symp., (1996), 237-242
  42. Harald Slinde, Jacek T. Gabzdyl, David R, F, West and Roger C. Reed, : The Influence of Assist Gas during Laser Welding of Low-Alloy Steel, LAMP'92, (1992), 469-475.
  43. Jong-Do Kim, Myeong-Hoon Lee, Young-Sik Kim, Seiji Katayama, Akira Matsunawa : Diagnostics of Plasma Induce in ND:YAG Laser Welding of Aluminum Ally
  44. Susumu Tsukamoto, kazuo Hiraoka, Yoshikazu Asai, Hirosada

- Irie, : Characteristics of Stable Induced Laser Plasma, ICALEO'96, Laser Institute of America, 81(1996), Section B 76-85
45. H. C. Tse, H. C. Man, T. M. Yue : Effect of the Magnetic field on Plasma Control during CO<sub>2</sub> Laser Welding, ICALEO'98, Laser Institute of America, 16-19(1998), Section C 268-277
46. R. Fabbro : Beam-plasma Coupling in Laser Material Processing, LAMP, (1992), 305-310
47. I. Miyamoto & H. Maruo : Spatial and Temporal Characteristics of Laser - Induced Plasma in CO<sub>2</sub> Laser Welding, LAMP, (1992), 311-316
48. R. Fabbro, A. M. de Frutos, J. M. Orza : Study of Laser Induced Plasma in Welding Continuous High Power CO<sub>2</sub> Laser, LAMP, (1992), 323-328

## 감사의 글

짧은 2년이었지만 이전에는 알지 못했던 소중한 것들을 깨달아 가며 그 동안 노력의 결과로 작은 성과를 얻을 수 있었습니다. 우선 석사과정을 지내는 동안 부족한 저를 세심한 관심과 배려로 지도해 주신 김종도 지도 교수님께 머리 숙여 깊이 감사 드립니다. 하나를 더 알거나 이름을 떨치기보다는 먼저 사람이 되라는 말씀 오래도록 기억하겠습니다. 이 논문이 있기까지 도움을 주신 많은 분들께 조금이나마 감사의 마음을 전하기 위해 이 글을 씁니다.

먼저, 대학원에 첫발을 내딛을 때 아는 것 없고 모든 환경이 어색한 저에게 밝은 웃음과 따뜻한 마음으로 연구에 잘 적응할 수 있도록 도와주셨으며, 바쁜 와중에도 귀중한 시간을 할애하여 세심하게 논문심사를 해주신 이명훈 교수님께 깊이 감사드립니다. 항상 온화한 성품으로 부족한 저를 너그럽게 봐주시며 논문에 많은 조언을 해주신 김윤해 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 또한 근엄하신 모습으로 진정한 학문의 자세를 몸소 실천하시며 연구자의 모범을 보여주신 김영식 교수님께 감사의 마음을 느낍니다. 비록 옆에 있지 않았지만 대학원에 진학할 수 있도록 상담해 주시고 항상 밝은 얼굴로 조언해주셨던 부경대 조상명 교수님께도 감사하다는 말씀 드리고 싶습니다. 옆에서 묵묵히 지켜봐 주시며 따끔한 충고와 조언을 아끼지 않으셨던 많은 교수님들께 다시 한번 머리 숙여 감사 드립니다. 그리고 해양대로 올 수 있게 이끌어주고, 대학원 진학으로 새로운 시작을 할 수 있도록 도와주신 하승협 선배님께 진심으로 감사드립니다. 연구를 수행하면서 많은 실험을 함께 하시며 조언을 아끼지 않으셨던 POSCO의 이종봉 박사님, 남기옥 대리님과 RIST의 김기철 박사님께도 고마운 마음을 전합니다.

함께 공부하자는 나의 제안을 기꺼히 승낙하여 그동안 많은 도움을 주

며 연구를 함께 했던 후배 유승조군, 항상 옆에 있으며 기쁨과 웃음을 함께 하였던 후배 박정규군, 유창한 말솜씨와 남다른 제주로 도움을 준 이창제군, 짧은 시간이었지만 함께 연구했던 후배 염재현군에게도 고맙다는 말을 남기고 싶습니다. 늘 옆에서 지켜봐 주며 기쁨과 슬픔을 함께 나누고 잘 해낼 수 있도록 힘을 주었던 신선영씨, 김민우씨와 이 성과를 함께 나누고 싶습니다.

마지막으로, 저에게 큰 기대를 가지시고 무엇이든 힘껏 밀어주셨지만 지금은 고인이 되신 아버지, 많은 나이에든 불구하고 저의 뒷바라지에 몸을 아끼지 않으신 어머니께 감사드리며 이 결실이 큰 기쁨이 되기를 바랍니다. 그리고 멀리서나마 몸 건강히 잘 해낼 수 있도록 걱정하고 응원해주신 누님과 매형께도 감사드리며, 그동안 여러 가지 도움과 성원을 아끼지 않으셨던 많은 분들과 이 작은 결실을 함께 나누고 싶습니다.