



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2024년 2월
석사학위 논문

아연 제거 효과를 고려한
아연도금강판 레이저 용접에서의
기공제어

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

김 효 성

아연 제거 효과를 고려한
아연도금강판 레이저 용접에서의
기공제어

Porosity Control in Laser Welding of Galvanized Steel
Sheets Considering Zinc Removal Effect

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 효 성

아연 제거 효과를 고려한
아연도금강판 레이저 용접에서의
기공제어

지도교수

방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 효 성

김효성의 석사학위논문을 인준함

위원장 손윤철 (인)

위 원 방희선 (인)

위 원 박철호 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

목차

List of Figures	III
List of Tables	IV
Abstract	V
제1장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	3
1.3 자동차 카울 패널	8
1.3.1 개발 대상 부품	8
1.3.2 개발 부품 구성	9
제2장 이론적 배경	10
2.1 레이저의 원리 및 특성	10
2.1.1 레이저의 방출 원리	10
2.1.2 레이저의 특성	12
2.2 파이버 레이저 용접 특징	13
2.3 아연 도금강 아크용접부 결함	14

2.4 3단계 Laser stitch welding 공정	16
제3장 실험 방법	17
3.1 실험 장치	17
3.2 사용소재 및 시험편제원	18
3.3 레이저 스티치 용접 조건	20
3.4 인장-전단 하중 시험	22
3.5 경도 측정	23
3.6 미세조직 관찰	24
3.6.1 광학현미경	24
3.6.2 주사현미경(SEM)	25
3.7 비파괴 검사	26
3.7.1 방사선투과 검사	26
3.7.2 액상침투탐상 검사	27
3.8 EN ISO(13919-1) 규격	28
제4장 연구 결과	29
4.1 비파괴검사를 통한 용접부 결함 평가	29
4.1.1 방사선 투과 검사 결과	29

4.1.2	액상침투 탐상 검사 결과	30
4.2	공정변수에 따른 비드 특성	31
4.2.1	단독 스티치 vs. 3단계 스티치 비드 특성	31
4.2.2	3단계 스티치 비드 특성	34
4.3	레이저 스티치 용접부 기계적 성능 평가	38
4.3.1	인장-전단 하중 평가	38
4.3.2	경도분포 특성	41
4.4	레이저 스티치 용접부 금속학적 특성 분석	44
4.4.1	용접부 영역별 미세조직 분석	44
4.4.2	SEM-EDS를 통한 용접부 성분 분석	45
제5장	결론	47
참고문헌	48

List of Figures

Fig. 1.1	아연도금강판 저항 점 용접 적용시 발생하는 용접결함 사례	2
Fig. 1.2	아연도금강판 겹치기 용접부 레이저 용접공정 모식도 및 단면 형상	2
Fig. 1.3	헴핑비드 갭을 적용한 아연도금강판 레이저 용접 공정	3
Fig. 1.4	Nissin Steel corp. 아연도금강판 레이저 용접 특허	3
Fig. 1.5	Nissin Steel corp. 아연도금강판 레이저 용접 특허	4
Fig. 1.6	GM corp. 아연도금강판 레이저 용접 특허	4
Fig. 1.7	레이저-아크 하이브리드 복합열원 모식도 및 용접부 품질 비교	5
Fig. 1.8	Ti계 Gap paste를 활용한 아연도금강판 아크용접	5
Fig. 1.9	TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 결함 평가	6
Fig. 1.10	쥘성우하이텍 아연도금강판의 레이저 용접 특허	6
Fig. 1.11	TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 결함 평가	7
Fig. 1.12	TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 결함 평가	8
Fig. 1.13	카울 패널 조립체의 위치 및 부품 형상	9
Fig. 1.14	카울 패널 조립체의 부품 구성도	9
Fig. 1.15	카울 패널 조립체 제작과정	10
Fig. 2.1	Pumping of laser	11
Fig. 2.2	레이저 스티치 용접 세부 단계별 공정 모식도	17
Fig. 3.1	Fiber laser machine	18
Fig. 3.2	SGARC 340 레이저 스티치 시험편 형상	19
Fig. 3.3	Process of shear test	22
Fig. 3.3	Micro vickers hardness tester	23
Fig. 3.5	Optical microscope	25
Fig. 3.6	HITACHI corp. SU5000 주사전자현미경(SEM)	26
Fig. 3.7	Dandong Huar i corp XXG-3005 방사선 투과 시험 장비	26
Fig. 4.1	초점거리20mm, 출력 2.4kW 인장전단 강도 및 파단 형상	38
Fig. 4.2	초점거리에 따른 인장전단 강도 비교	39
Fig. 4.3	초점거리20mm, 출력 2.4kW 피치에 따른 인장 전단 강도	40

Fig. 4.4 초점거리20mm, 출력변화에 따른 용접부 경도 분포 42
Fig. 4.5 단독 스티치 용접부 및 3단계 스티치 용접부의 SEM-EDS 측정 위치 .. 45

List of Table

Table. 3.1	The chemical compositions of SGARC340	19
Table. 3.2	Mechanical properties of base materials	19
Table. 3.3	Welding Conditions	21
Table. 3.4	Micro vickers hardness tester	23
Table. 3.5	액상침투 탐상 검사 시험 방법	27
Table. 3.6	레이저 용접부 결함 평가 기준	28
Table. 4.1	단독 스티치 및 3단계 스티치 방사선 투과 검사 결과	29
Table. 4.2	단독 스티치 및 3단계 스티치 액상침투 탐상 검사 결과	30
Table. 4.3	용접 단계별 용접부 외관 및 단면 분석	32
Table. 4.4	용접 모드에 따른 용접부 외관 및 단면 분석	32
Table. 4.5	용접부 외관 결함 관찰 및 분석	33
Table. 4.6	초점거리 20mm 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 분석	34
Table. 4.7	초점거리 25m 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 분석	35
Table. 4.8	초점거리 30mm 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 분석	36
Table. 4.9	단독 스티치 및 3단계 스티치 용접부의 미세조직 관찰	44
Table. 4.10	단독 스티치 및 3단계 스티치 용접부의 SEM-EDS 결과	46

ABSTRACT

Porosity Control in Laser Welding of Galvanized Steel Sheets Considering Zinc Removal Effect

Kim Hyo Sung

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science
Engineering,

Graduate School of Chosun University

This study focuses on addressing the quality issues related to welding defects in overlapping zinc-coated steel sheets for automobiles. To achieve this, the application of the 3-step laser stitch welding process is emphasized. This method effectively resolves welding defects occurring in resistance spot welding and offers economic benefits and industrial feasibility.

The research investigates the welding characteristics by varying process parameters such as laser output, focal distance, welding speed, and pitch interval in both single laser stitch welding and 3-step laser stitch welding. The 3-step laser stitch process consists of three stages, each with different parameters. The first stage involves an output of 1.6 kW, focal distance of 20 mm, and welding speed of 20 mm/s. The second stage has an

output of 0.8 kW, focal distance of 20 mm, and welding speed of 60 mm/s. The final stage includes outputs of 2.0 kW, 2.4 kW, and 2.8 kW, focal distances of 20 mm, 25 mm, and 30 mm, and welding speed of 35 mm/s. The pitch intervals are set at 20 mm, 40 mm, and 60 mm.

Through visual and non-destructive inspections, the experiments demonstrate a significant reduction in defects, particularly when using the 3-step laser stitch welding process. The SEM-EDS analysis indicates that the zinc (Zn) content at the joint interface is 1.78% for single stitch welding but 0% for 3-pass stitch welding, indicating effective zinc removal when using the 3-step process.

These findings contribute valuable information for securing high-quality welding joints and effectively addressing zinc-coated steel sheet welding quality issues in the automotive and industrial sectors.

제 1 장. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 미국 및 유럽 등의 지역에서는 기후적 특성상 연간 평균 적설량이 높은 방청 가혹 지역으로 분류되어 있다. 이로 인해 더 높은 수준의 방청 성능이 요구되며, 특히 아연도금강판을 적용한 차체 부품의 용접 품질 개선에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 연구는 방청성을 향상시키기 위한 관련 기술의 공정 개발에도 적극적으로 기여하고 있다.

아연 도금강판은 자동차 제조에 많이 사용되는 재료 중 하나로, 우수한 부식 저항성과 특수한 환경에서의 방청 성능을 제공한다. 그러나 방청 가혹 지역에서 사용될 경우, 용접 과정에서 발생할 수 있는 결함 문제가 큰 고려사항이 된다. 이에 따라 아연 도금강판 용접 품질의 개선을 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 향상된 방청성을 달성하기 위한 기술의 개발이 필요하다. 또한, 저항 점용접을 통한 아연 도금강판 용접시 타점 진행과 동시에 도금층과 전극(Electrode) 사이 합금 성분의 상호확산 작용이 지속됨에 따라 전극에 흡착(Pick-up) 현상과 마모가 발생하여 타점 수가 증가할수록 용접성이 저하되며, 전극 교체에 따른 생산라인 사이클 타임에 영향을 미친다. 카울 패널 조립체는 저항 점용접이 적용됨에 따라 상·하판 겹치기 이음부로 구성된다.[1]

용접부 내에 잔류된 아연으로 인해 취성의 성질을 갖고있는 금속간화합물(IMCs)이 생성되고, 용접 잔류응력이 작용함으로써 Fig. 1.1과 같이 크랙이 발생되며, 용접부에 형성된 크랙 및 기공은 하중 작용시 응력집중 현상 발생 원인이 되어 인장 강도 및 피로 하중 등 용접부의 기계적 성질을 저하시키고, 아울러 공정 특성상 충분한 플랜지(Flange) 길이와 가용면적이 요구되므로 차체 중량증가에 영향을 미치며, 부품 설계 및 생산 방식에 대한 기술적 한계가 있다.[2]

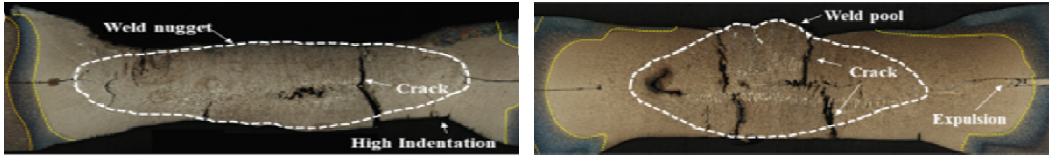


Fig 1.1 아연 도금강판 저항 점용접 적용 시 발생하는 용접결함 사례

Fig 1.2와 같이 레이저 용접은 집속화된 고밀도 에너지를 용접부에 조사함으로써, 고압증기가 발생됨에 따라 용융 금속부에 키홀(Key-hole)이 형성되고, 키홀을 통해 재료 내부로 열에너지가 전달되면서 용접이 이루어지는 공정이다. 레이저 용접은 저항 점용접에 비해 상대적으로 적은 입열량이 요구됨으로써 용접변형 및 용접 잔류응력을 감소시킬 수 있으며, 키홀 형성에 의해 좁고 깊은 용접부가 얻어짐에 따라 열영향부(Heat affected zone)가 최소화된 건전한 용접부를 확보할 수 있다.



Fig 1.2 아연 도금강판 겹치기 용접부 레이저 용접공정 모식도 및 단면 형상

특히, 본 연구에서는 아연 도금강판 용접시 레이저 열원을 적용하여 본 용접(완전용입) 전 단계인 열전도 용접을 통해 용접결함을 유발하는 아연 도금층 및 아연 증기를 제거하는 방법을 수행하였다.

1.2 국내외 기술 동향

1) 국외 아연 도금강판 용접 기술 현황

최근 Fig. 1. 3과 같이 갭을 이용한 아연 도금강판 용접의 경우 추가적인 부착재 및 삽입재를 사용하지 않고 단독 레이저 열원을 적용하여 하부 판재에 높이 약 0.1mm 정도의 험핑 비드(Humping bead)를 형성시키고, 겹치기 용접을 진행함으로써 고품질의 용접부를 확보한 기술개발 사례가 있었으며, 단독 레이저 열원이 적용됨에 따라 공정 자동화에 적합하여 관련 업계에 높은 평가를 받고 있다.

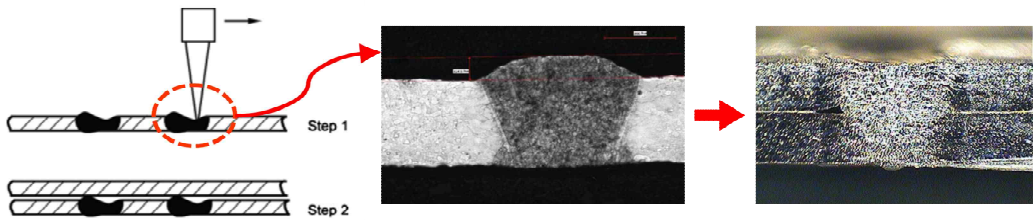


Fig. 1.3 레이저 단독열원 험핑비드 갭을 적용한 아연도금강판 레이저 용접 공정

일본 Nissin Steel(社)는 Fig. 1.4와 같이 아연 도금강판 레이저 용접시 판재 표면에 Si를 용사함으로써, 용융금속의 점성을 저하시켜, 용접시 발생하는 아연 증기를 원활하게 대기중으로 배출시키는 방법에 대한 지식재산권을 보유하고 있으며, 실험을 통해 아연도금 표면에 용사되는 Si층 두께가 증가할수록 블로우홀(Blow hole) 발생량이 감소되어 나타남을 입증하였다.

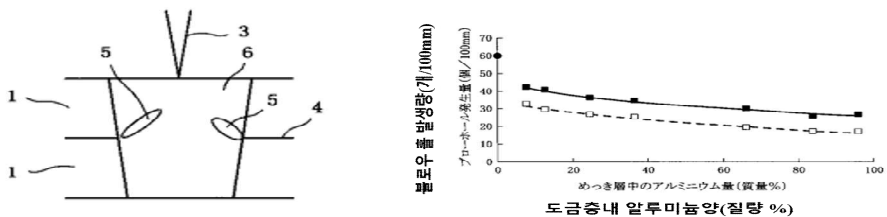


Fig. 1.4 Nissin Steel社 아연도금강판 레이저 용접 특허보유 현황

일본 FANUC(社)는 Fig. 1.5과 같이 아연 도금강판 상하판 사이에 탄소계 금속판을 배치하여 레이저 용접을 실시함으로써, 용접중 형성되는 기공을 금속판을 통해 흡수하고, 결과적으로 용접부의 크랙 발생을 최소화 시켜 건전한 용접부를 확보하는 방법에 대한 지식재산권을 보유하고 있다.

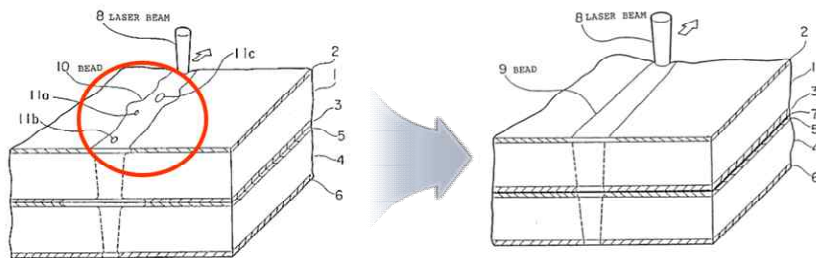


Fig. 1.5 FANUC社 아연도금강판 레이저 용접 특허보유 현황

미국 GM(社)는 Fig. 1.6와 같이 아연 도금강판 겹치기 레이저 용접시 레이저 빔 후방에 산소 배관을 장착하고, 압축산소를 용접부 표면에 분사시켜 산소와 아연간의 화학적 작용을 발생시켜 고체 상태의 산화아연 형성을 촉진시킴으로써 용접 중 기화 아연에 의해 형성되는 기공 억제하는 방법에 대한 지식재산권을 확보하고 있다.

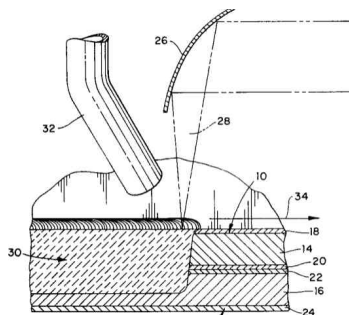


Fig. 1.6 GM(社) 아연도금강판 레이저 용접 특허보유 현황

해외 선진국 기술개발 사례중 Fig. 1.7와 같이 레이저(Diode-laser), 아크(MAG) 복합열원을 통한 아연 도금강판 용접 시 기화 아연 배출 통로인 갭이 없는 상태에

서 아크 단독열원 대비 용접부 내의 기공 및 크랙과 비드 표면의 블로우홀 등 결함 없이 양호한 용접 특성이 나타남을 확인하였다.

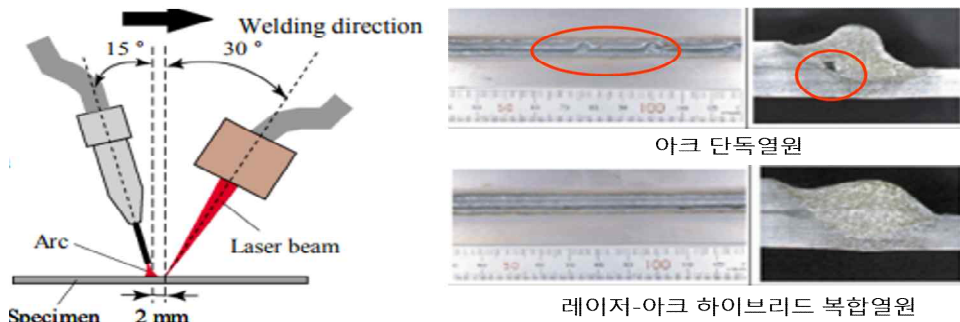


Fig. 1.7 레이저-아크 하이브리드 복합열원 모식도 및 용접부 품질 비교

2) 국내 아연 도금강판 용접 기술 현황

아연 도금강판 용접부 결함에 따른 품질 문제의 중요성이 부각됨에 따라 국내에서도 고품질의 용접부를 확보할 수 있는 공정 기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이에 Fig. 1.8과 같이 겹침 이음부 사이에 도포재나 금속 삼입재를 사용하여 갭을 형성시키고, 아연 배출을 유도함으로써 용접부의 품질을 향상시키는 방법이 일반적으로 사용되고 있으나, 전처리 공정 소요시간이 요구되며, 갭 형성을 위한 소모품에 대한 추가 비용이 발생하므로 차체 부품 양산라인 적용에 한계가 있다.

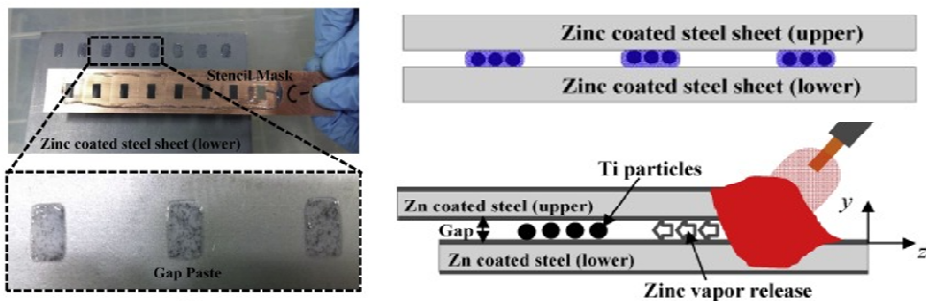


Fig. 1.8 Ti계 Gap paste를 활용한 아연 도금강판 아크용접 방법

최근 국내에서도 두 개의 복합열원이 동시에 적용되는 하이브리드 용접공정에 대한 기술개발이 진행되고 있으며, Fig. 1.9와 같이 아연 도금강판 용접 시 TIG 열원을 선행시켜 아연의 기화 온도까지 조성시키고, 본 용접인 MIG 열원을 후행시키는 방법으로 용접부의 기공 형성을 최소화 시킬 수 있으나, 복합열원간의 거리 및 보호가스의 간섭효과 등 고려사항이 많으며, 하이브리드 공정 및 장비 설치 등 추가 비용이 요구된다.

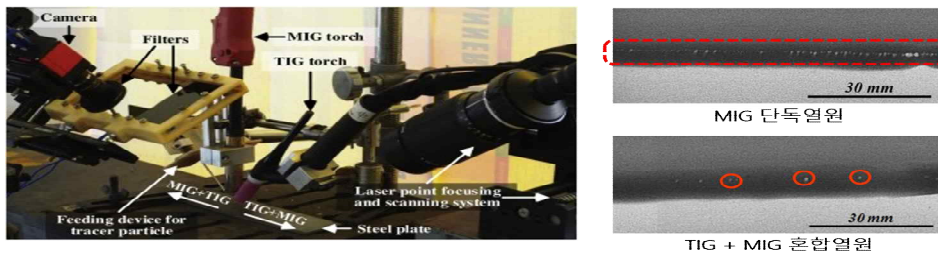


Fig. 1.9 TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 기공 결함 평가

㈜성우하이텍은 Fig. 1.10와 같이 아연 도금강판의 겹침 이음부 레이저 용접 시 상·하판 소재 각각에 대해 용접 열전도 모드를 통해 아연 도금층을 제거하는 전처리공정을 거친 후, 다시 아연 도금강판을 서로 겹친 상태로 레이저 키홀 모드 용접을 진행하여 아연 증기에 의한 용접부 기공 형성에 따른 크랙 현상을 방지하고, 양호한 용접 품질을 확보할 수 있는 방법에 대한 지식재산권을 보유하고 있다.

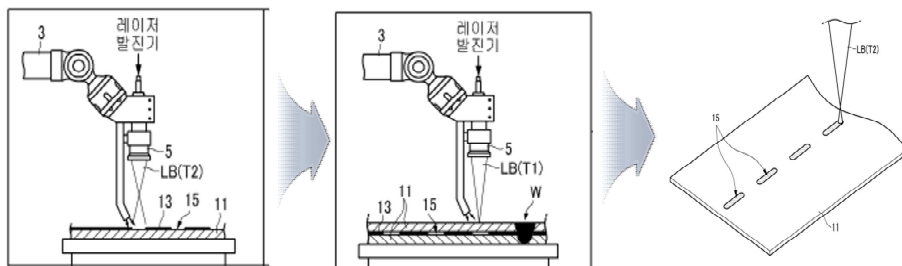


Fig. 1.10 ㈜성우하이텍 아연 도금강판의 레이저용접 특허보유 현황

(주)세원정공은 Fig. 1.11와 같이 아연 도금강판 레이저 용접 시 겹치기 이음부 사이에 접착테이프를 부착하여 상·하판 사이에 갭(Gap)을 형성시키고, 클램프(Clamp) 등 구속 장비로 밀착시켜 레이저 스티치 용접을 진행함으로써, 용접 시 발생하는 아연 증기의 배출을 유도하는 방법에 대한 지식재산권을 확보하고 있다.

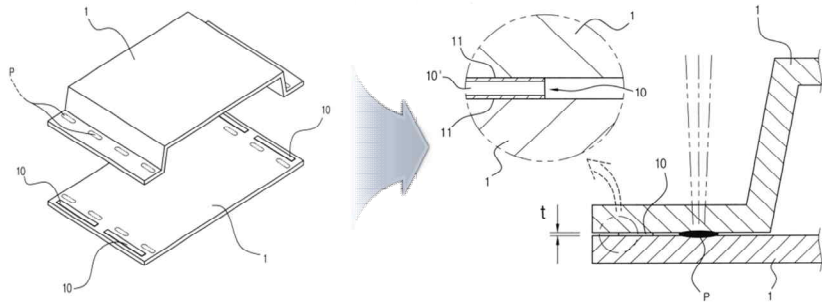


Fig. 1.11 TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 기공 결함 평가

(주)서진산업은 차체 부품회사로 본사와 동일한 PNL ASSY-COWL 부품을 생산하고 있으며, Fig. 1.12와 같이 아연 도금강판 용접 시 TIG, MIG 복합 아크 열원을 적용하여 선행되는 TIG 용접을 통해 아연 기화할 수 있는 온도 영역을 조성시켜 배출을 유도하며, 후행하는 MAG 용접을 통해 용접이 이루어지는 방법에 대한 지식재산권을 보유하고 있다.

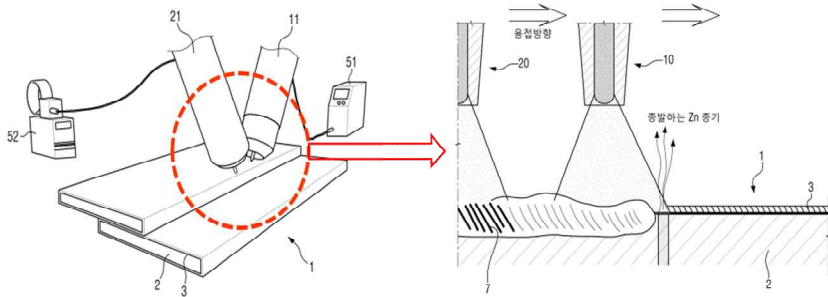


Fig. 1.12 TIG-MIG 하이브리드 복합열원 공정 세팅 및 용접부 기공 결함 평가

1.3 자동차 카울 패널

1.3.1 개발 대상부품

본 연구개발의 대상 부품은 카울 패널 어셈블리(PNL ASSY-COWL COMPLETE)으로 완성품 크기는 약 1.2m × 0.2m 정도로 대형 조립품에 해당되며, Fig. 1.13과 같이 자동차 전면 프런트 윈도우와 연결되는 차체 BIW(Body in white) 골격 부재로 계기판, 핸들, 엔진룸을 연결해주는 지지대 기능을 한다.

또한, 환기 덕트 기능과 엔진룸으로 침투되는 이물질을 방지하여 와이퍼 암(Wiper arm) 및 작동 모터 등 차체 부품을 외부의 환경으로부터 보호하며, 차량 충돌시 충격 흡수를 통해 대시 패널의 차량 내부 유입을 방지하여 탑승자의 안전을 보호할 수 있는 역할을 한다.

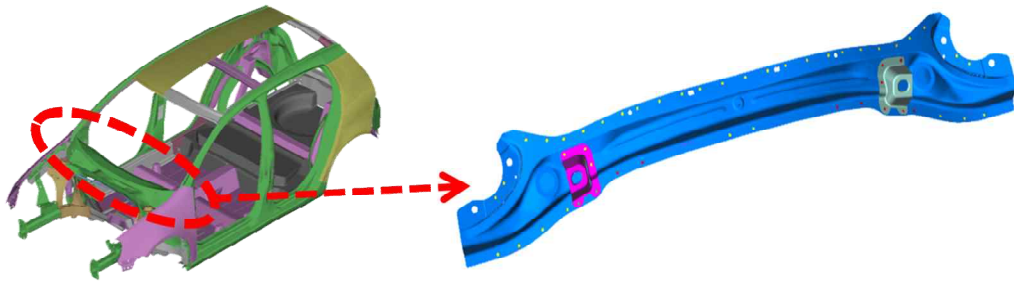


Fig. 1.13 카울 패널 조립체의 위치 및 부품 형상

1.3.2 개발 부품구성

Fig. 1.12와 같이 카울 패널은 조립체는 ① REINF-COWL INR LWR, ② MEMBER ASSY-COWL ③ LWR, BRKT-WIPER MOTOR MTG 3개의 단품으로 구성되며, 주행중 유입되는 빗물과 워셔액 등 이물질에 의한 부식을 방지하기 위해 우수한 내식성을 보유한 아연(Zn)도금강판이 적용된다.

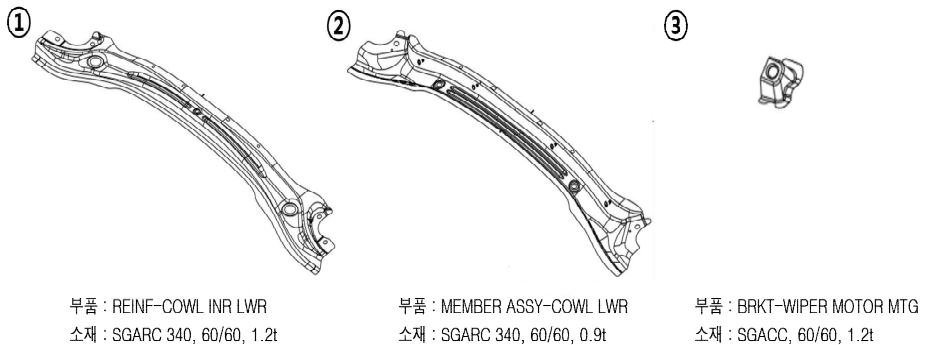


Fig. 1.14 카울 패널 조립체의 부품 구성도

아연 도금강판은 냉연강판에 아연을 도금시켜 내식성과 부식성을 향상시킨 제품으로, 최근 완성차 기업의 부식방지 요구기준이 높아짐에 따라 차체 및 샤시 부품 등 산업 전반에 사용되고 있으며, 일반 무도금 강판 대비 차체 부품 소재 적용률이 점차 증가하고 있다.

Fig. 1.14와 같이 카울 패널 조립 시 ①번과 ②번 단품은 MS181-15 규격에 의거한 저항 점 용접(Spot welding) 공정이 적용되어 판재 끝단의 모서리 라인을 따라 일정 간격(Pitch)마다 총 47개소의 타점이 요구되므로 부품 조립 시 상대적으로 긴 공정시간이 소요되며, 단품별 부품 조립, 조립체 완성품 검사 등 카울 패널 제작과정은 Fig. 1.15와 같다.

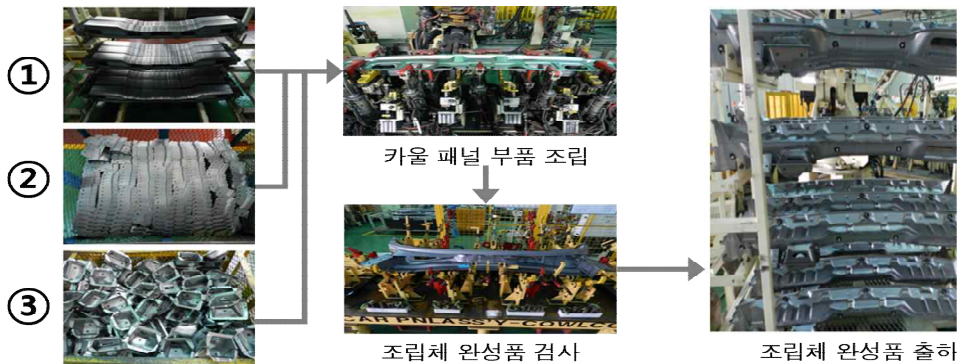


Fig. 1.15 카울 패널 조립체 제작과정

제 2 장 . 이론적 배경

2.1 레이저의 원리 및 특성

2.1.1 레이저의 방출 원리

레이저는 기본적으로 세 부분으로 이루어져 있다: 광을 발생시키는 매질, 이 매질을 연결시키기 위한 에너지원(펌핑소스), 그리고 레이저 빛을 모으고 증폭하기 위한 광공진기로 이루어져있다.

레이저 동작 원리는 자극 방출 방식과 밀도 반전(population inversion) 개념을 기반으로 한다. 일반적인 원자나 분자는 기본적으로 낮은 에너지 준위에 있으며, 자연방출(natural emission)을 통해 에너지를 방출한다. 그러나 레이저 작동을 위

해서는 높은 에너지 준위에 있는 원자들이 낮은 에너지 준위에 있는 원자들보다 더 많이 존재해야 한다. 이렇게 높은 에너지 준위에 원자들이 더 많이 머물러 있는 상태를 "밀도 반전"이라고 한다.

레이저 동작 과정은 다음과 같다.

1) 펌핑(Pumping): 외부에서 에너지를 공급하여 높은 에너지 준위에 있는 원자들을 활성화시킨다. 이렇게 펌핑된 원자들은 더 높은 에너지 준위로 이동하게 된다.

2) 밀도 반전: 펌핑 과정으로 원자들이 높은 에너지 준위에 모여 밀도 반전 상태가 형성된다. 이 상태에서는 높은 에너지 준위에 있는 원자들이 낮은 에너지 준위에 있는 원자들보다 더 많이 존재한다.

3) 자극 방출과 유도 방출: 높은 에너지 준위에 있는 원자들은 외부에서 자극을 받으면 낮은 에너지 준위로 떨어지면서 광자를 방출한다. 이 과정이 자극 방출(stimulated emission)이라고 한다. 이때, 이미 증폭된 광자들과 동일한 주파수와 위상을 갖는 광자들이 상호작용하면서 더 많은 광자들이 방출된다. 이 과정이 유도 방출(induced emission)이다.

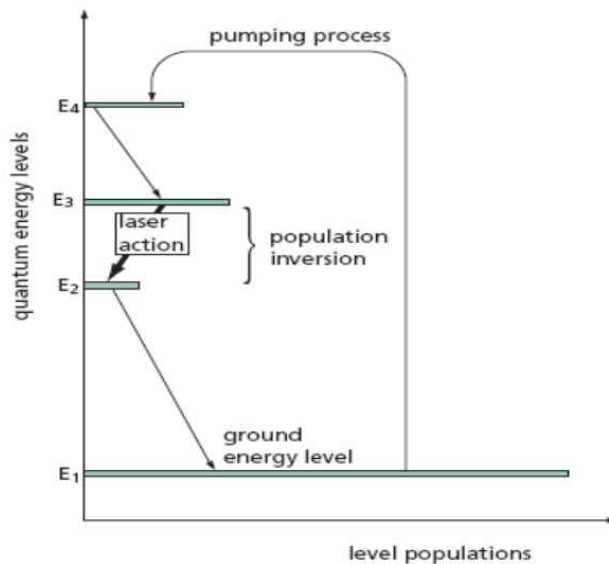


Fig. 2.1 Pumping of laser

Fig. 2.1에서 설명된 레이저 작동 원리는 다음과 같다.

1) **펌핑과 밀도 반전:** 펌핑 소스에 의해 에너지를 흡수한 원자는 기저 상태 (E1)에서 높은 에너지 준위인 여기 상태 (E4)로 천이한다. 하지만 여기 상태에서 머무는 시간은 매우 짧기 때문에 자연방출에 의해 준안정 상태인 E3로 빠르게 떨어진다. 충분한 수의 원자가 준안정 상태 E3에 머물러 밀도 반전 상태를 형성한다.

2) **유도방출:** 준안정 상태인 E3의 원자들은 유도 방출에 의해 낮은 에너지 준위인 E2로 떨어지고, 그리고 곧이어 기저 상태인 E1로 돌아간다. 에너지 준위 E2의 원자 수가 기저 상태 E1의 원자 수보다 훨씬 적기 때문에 E3와 E2 사이에서 밀도 반전 상태가 형성된다.

3) **레이저 작용 원리:** 레이저 작동은 준안정 상태인 E3에서 낮은 준위인 E2로 천이할 때, 이 에너지 차이에 해당하는 빛이 방출되는 원리를 이용한다. 레이저 매질의 양단에 반사거울을 설치하여 빛이 이 사이를 왕복하면서 증폭된다. 증폭이 손실보다 크면 발진을 일으키게 된다. 한쪽 거울은 100% 반사하여 전반사하도록 만들고, 반대쪽 거울에서는 일부분의 빛이 투과하도록 만들면 발진된 빛의 일부가 밖으로 나오게 되어 레이저 광을 얻을 수 있다.

4) **레이저 빛의 특성:** 레이저 매질 내에서 초기에 자연 방출되는 빛은 사방으로 나가지만, 레이저 축과 수직인 두 개의 반사거울 사이를 여러 번 왕복하는 과정에서 축방향의 빛만 유도방출 과정을 거쳐서 증폭된다. 이로 인해 레이저 빛은 발생 과정에서 축방향의 빛만 나오기 때문에 퍼지지 않고 한 방향으로 멀리까지 갈 수 있다. 이러한 특성으로 인해 레이저는 다양한 산업 분야에서 사용되며, 높은 집중도와 강력한 빛을 제공하여 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 한다.[3]

2.1.2 레이저의 특성

레이저(LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)는 빛의 증폭을 통해 단색성과 강력한 광선을 생성하는 기술로, 인공적으로 전자기파를 빛으로 만들어낸다. 레이저의 주요 특성은 다음과 같다.

1) **직진성(지향성)**: 레이저 빛은 레이저 공진기 내에서 수백 번 왕복하여 계속해서 직진하려는 성질을 가진다. 이러한 특성으로 인해 레이저 빛은 멀리까지 정확하게 직진하며, 레이저 포인터나 레이저 쇼 등에서 잘 관찰할 수 있다. 이러한 직진성은 레이저를 거리 측정, 레이더, 원격 계측 등에 활용하는 데 중요한 역할을 한다.

2) **단색성**: 레이저 빛은 유도방출 원리에 의해 특정한 에너지 준위 차만 이용하므로 발생하는 빛의 주파수 또는 파장이 매우 일정하다. 다른 광원에서 나오는 빛은 여러 개의 파장을 가지지만 레이저 빛은 거의 분산이 없이 일정한 파장의 빛으로 이루어져 있다. 이러한 특성을 이용하여 동위원소 분리, 원격 미량원소 측정, 분광분석 등에 응용된다.

3) **고휘도성**: 레이저 빛은 휘도란 단위입체각(solid angle)에서 나오는 빛의 출력밀도로 정의되는 물리량으로서, 광원의 지향성 및 출력 밀도에 의해 결정된다. 레이저는 다른 광원보다 휘도가 매우 높기 때문에 높은 집중도의 빛을 발산할 수 있다. 이 특성은 레이저를 가공 작업(절단, 용접, 천공, 표면 처리)과 레이저 무기, 핵융합 등에 활용하는 데 중요하다.

4) **가간섭성**: 가간섭성 또는 일정한 상관관계를 가진 성질을 의미한다. 레이저 빛은 매우 높은 가간섭성을 가지고 있으며 파장, 위상, 편광 등이 균일하게 정돈된 전자기파로 구성된다. 이러한 가간섭성은 레이저를 이용한 홀로그래피, 미소변위 및 진동 해석, 비파괴 검사 등에 활용되며, 매우 정밀한 측정 및 분석에 사용된다.[4]

2.2 파이버 레이저 용접 특징

파이버 레이저 용접은 레이저를 사용하여 금속이나 비금속 소재를 용접하는 공정으로, 다른 레이저 용접 방법과 비교하여 여러 가지 특징이 있다. 아래는 파이버 레이저 용접의 주요 특징들이다.

1) **높은 집중도**: 파이버 레이저는 빛을 파이버 광섬유로 전송하여 용접 지점에

매우 높은 집중도의 빛을 제공한다. 이로 인해 작은 용접 구멍과 좁은 용접 폭을 만들 수 있어, 더 정밀하고 세밀한 용접 작업이 가능하다.

2) **높은 에너지 밀도:** 파이버 레이저는 다른 레이저와 비교하여 더 높은 에너지 밀도를 가집니다. 따라서 용접 속도가 빠르고, 높은 에너지를 가지고도 작은 용접 지점을 형성할 수 있다.

3) **안정성과 신뢰성:** 파이버 광섬유는 유연하고 내구성이 뛰어나기 때문에 레이저 빔을 효율적으로 전송할 수 있다. 이러한 광섬유의 특성은 레이저 시스템의 안정성과 신뢰성을 높여준다.

4) **원격 제어 용이성:** 파이버 레이저 용접은 레이저 발생기와 광섬유 전송이 분리되어 있으므로, 레이저 빔을 원격으로 제어하고 적용할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 어려운 위치에 접근해야 하는 용접 작업이나 로봇을 이용한 자동화 용접에 적합하다.

5) **좁은 열영향부 :** 파이버 레이저 용접은 높은 집중도와 높은 에너지 밀도로 인해 좁은 열영향부를 진다. 이로 인해 주변 소재에 전달되는 열이 최소화되고, 용접 과정에서의 왜곡과 소성이 감소하여 용접 부위의 품질이 향상된다.

6) **다양한 용접 소재:** 파이버 레이저는 금속과 비금속 소재 모두에 대해 용접이 가능하다. 강철, 알루미늄, 구리 등의 금속뿐만 아니라 플라스틱, 세라믹, 유리 등 다양한 소재에 대해 용접 작업이 가능하다.

7) **환경 친화적:** 파이버 레이저 용접은 일반적으로 더 낮은 에너지 소비를 가지고 있으며, 다른 용접 방법보다 적은 노이즈와 오염을 발생시킨다. 따라서 더 환경 친화적인 용접 방법으로 인정받고 있다.

이러한 특징으로 인해 파이버 레이저 용접은 정밀한 용접 작업이 필요한 산업 분야에서 널리 사용되고 있으며, 자동화 용접 시스템과 함께 더욱 효과적으로 활용되고 있다.[5]

2.3 아연 도금강 아크용접부 결함

아연 도금강판은 강재와 비교하여 낮은 용점을 가지고 있어 도장 작업이 용이하고, 높은 부식 저항성을 제공하는 장점이 있다. 그러나 이러한 소재의 특성으로 인해 도장된 아연과 강판 사이의 비등점 차이가 발생하며, 이는 용접 과정에서 아크열로 인해 증발한 아연이 증기 형태로 변하고, 이어서 기공 결함이 형성되는 치명적인 단점으로 작용한다.[6]

기공 결함은 용접 이음부의 강도를 저하시킬 수 있으므로, 이러한 결함을 해결하기 위해 후처리 공정이 반드시 필요하다. 후처리 공정은 기공 결함을 제거하고 용접 이음부의 강도를 증진시키는 역할을 한다. 이를 위해 기공 결함 부분의 표면을 정제하거나 추가적인 부식 방지 도장을 시행하는 등의 작업이 수행된다.

결함이 발생하는 매커니즘에 대해 설명하자면, 먼저 용접 시 발생하는 아크의 열로 인해 용점이 더 낮은 아연이 기화하게 된다. 기화한 아연은 용융된 강판의 결정립계 사이로 침투하게 되고, 아연 증기가 결정립계 내에서 잔류하게 되면서 나타나는 양상이 바로 기공 결함이다. 기공 결함은 블로우홀(Blow hole)과 피트(Pit)의 형태로 나뉘어져 있으며, 블로우홀은 기공이 용접부 내에서 빠져나가지 못한 채로 굳어진 것을 일컫으며, 피트는 증기가 빠져나가는 도중 굳어져 열린 기공의 형태를 띠는 것을 말한다.[7-10]

아연 도금강판은 차량의 내부식성과 내마모 성능을 향상시키기 위한 소재로 차체의 언더 플로어부와 실내부를 제외한 전 부위에 적용됨에 따라 아연도금강판 적용 비율은 70% 이상 차지하고 있으나, 완성차 기업의 방청성능 요구 수준이 높아짐에 따라 적용 비율이 점차 증가하는 추세이다.

그러나, 차체 부품용 강재에 비해 낮은 용융점을 갖고 있는 아연은 용접 시 기화되어 증기 상태로 배출되어야 하나, 용융부의 높은 점성과 용접부 표면에서부터 시작되는 응고 현상으로 용접부 내에 잔류하게 되며, 아연 증기로 인한 기공이 형성 및 성장함에 따라 용접결함이 발생하게 된다.

본 연구에서 제안하고자 하는 아연증기 배출을 고려한 레이저 스티치 용접 적용은

저항 점용접으로 부터 발생하는 용접결함 문제를 해결할 수 있으며, 아연 배출을 유도하는 상·하판 사이의 갭 생성 전처리 절차와 추가적인 복합열원 공정장비가 요구되지 않으므로 경제적이며 산업 적용이 용이하다. [11-12]

2.4 3단계 Laser stitch welding 공정

본 연구개발 과제를 통해 SGARC340 아연 도금강판이 적용된 카울 패널의 저항 점용접 적용에 따른 기술적 한계를 극복하고자 레이저 단독 열원을 이용하여 선행 절차로 아연 도금층을 기화시킨 다음 후행 절차로 본 용접을 실시하는 레이저 스티치(Stitch) 용접공정을 최초로 적용하여 용접부의 건전성 및 안전성을 확보하고자 한다.

현재까지 아연 도금강판 용접은 이음부 상·하판 사이에 갭(Gap)을 형성시키는 방법과 복합열원을 통한 하이브리드 용접방법이 고안되었으나, 갭 형성과정에서 전처리 공정이 요구되고, 복합열원을 사용한 선·후행 용접 시 추가 장비 설치에 따른 비용증가 등과 같은 어려움이 존재한다.

따라서 본 연구를 통해 단독 열원을 적용한 레이저 스티치 용접공정을 개발하고자 하며, Fig. 2.3와 같은 3단계 공정절차로 세분화하여 단계별 최적의 공정변수와 피치(Pitch) 간격을 도출하고자 하였다.

- ① 레이저 열전도 모드를 통해 하부 판재 상단 표면까지 용융시킴으로써 용접부의 아연 도금층 제거 및 아연의 기화 현상을 유도
- ② 첫번째 절차의 원점 위치로 복귀하며, 상대적으로 낮은 출력의 레이저 빔을 조사함으로써 예열환경 조성 및 용융부 아연 방출 촉진
- ③ 레이저 출력 증가를 통한 완전용입 모드로 하부 판재의 적정 두께까지의 용입깊이 확보 및 스티치 용접 진행

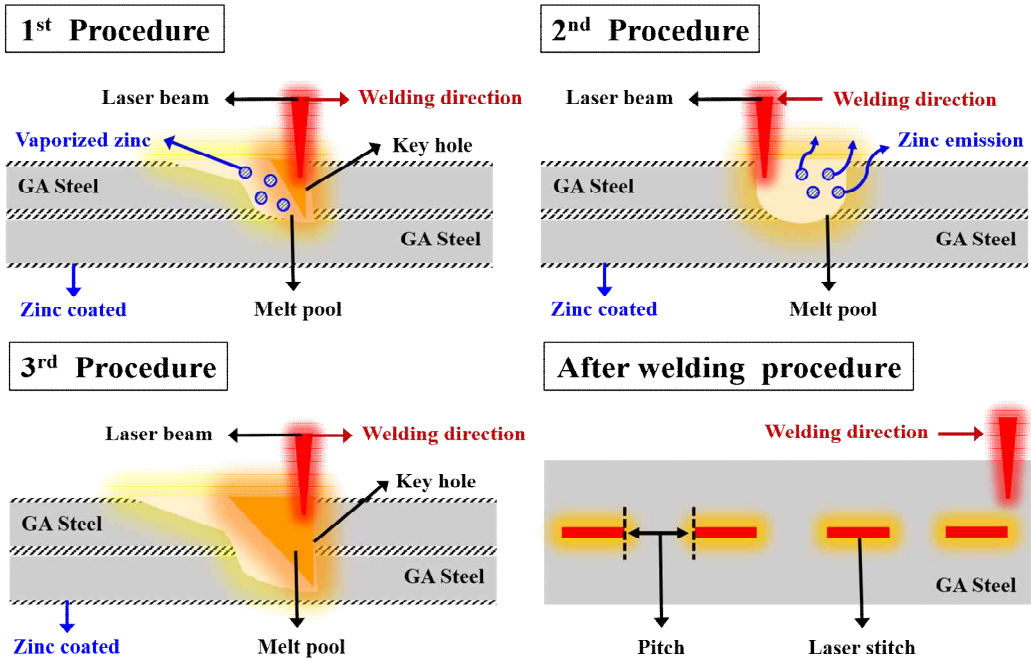


Fig. 2.2 레이저 스티치 용접 세부 단계별 모식도

제 3 장 . 실험방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 레이저 용접 장비는 LMS社의 CW Fiber laser 장비를 사용하였으며, 레이저 용접 자동화 설비인 3축 System 및 동축 카메라를 이용하여 원하는 좌표를 0.0001 mm 까지 측정 및 설정할 수 있어 정밀하게 용접을 진행하였다.



Fig. 3.1 Fiber laser machine(LMS社의 3축 Laser System)

3.2 사용소재 및 시험편제원

본 연구에서 Fig. 3.2에 나타낸 바와 같이 두께 1.2, 0.9(mm)의 SGARC340을 이용하여 파이버 레이저를 사용하여 레이저 스티치 용접을 실시하였다. 용접 시험편은 한국 산업규격인 저항 점용접 이음의 전단시험에 대한 시험편 치수 및 시험방법(KS B 0851)에 의거하여 Fig 3.2 및 Table 3.3에 나타낸 것과 같이 제작하였다. 시험편 상세 제원의 길이 270(mm), 폭 105(mm), 두께는 1.2(mm)와 0.9(mm), 판재 겹침 폭을 35mm로 하였다. 사용된 재료의 기계적 성질과 화학조성은 Table 3.1와 Table 3.2에 나타내었다.

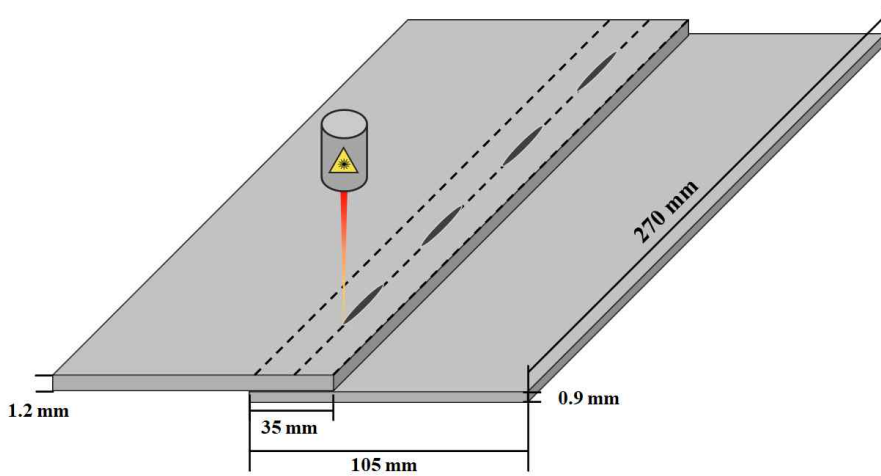


Fig. 3.2 SGARC 340 레이저 스티치 시험편 형상

Table. 3.1 The chemical composition of SGARC340 (wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	Ti	S-AL
SGARC340	0.001	0.048	0.005	0.01	0.43	0.033

Table. 3.2 Mechanical properties of base materials

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
SGARC340	359	198	39

3.3 레이저 스티치 용접 조건

레이저 스티치 용접시 주요공정 인자로 입사각(Angle beam incidence), 레이저 출력(Laser power), 용접속도(Welding speed), 용접의 시점 및 종점(Teaching points), 초점거리(Focusing length)를 고려하였다.

보호가스는 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 이용해 공기를 차단하여 용접 시 산화되는 것을 방지하도록 하였다. 보호가스 유량 및 초점위치는 예비 실험에서 얻은 적정 조건을 사용하였다.

겹치기 용접을 하기 전에 최적의 용접조건을 결정하기 위해 판재에 대한 비드 온 플레이트(Bead On Plate : BOP) 용접을 실시하였다. 비드 온 플레이트 실험결과로부터 종횡비가 큰 용접 공정변수를 결정하고 종횡비가 가장 큰 공정변수를 기준으로 레이저 빔 이송속도를 변화시켜 겹치기 용접을 실시한 후 레이저 빔 이송속도와 용접비드의 관계를 고찰하였다. 이때 레이저 출력을 2/2.5KW로 설정한 후 용접 속도(1/2m/min)에 따른 용입 특성을 고찰하였다. 실험에 사용된 레이저 실험조건은 Table 3.3에 나타내었다

Table. 3.3 Welding conditions

conditon	1 pass	3 pass procedure		
		1	2	3
출력 (Power, kW)	2.4	1.6	0.8	2., 2.4, 2.8
초점거리 (focal lenth, mm)	20	20	20	20, 25, 30
용접속도 (Welding speed, mm/s)	35	20	60	35
비드 간 거리 (Pitch)	20, 40, 60			
보호 가스 (Shielding gas, ℓ /mi)	10			
비드 길이 (Bead length, mm)	20			

3.4 인장-전단하중 시험

인장-전단하중 측정은 SHIMAZU사 EHF-EG200KN-40L 유압식을 사용하였으며, WIN SERVO 프로그램을 이용하였다.

시험편은 한국산업규격인 저항점용접 이음의 전단시험에 대한 시험편 치수 및 시험방법(KS B 0851)에 의거하여 와이어 커팅 방식으로 채취하였다.



Fig. 3.3 Process of shear test

3.5 경도측정

경도기는 Akashi HM-112 마이크로 비커스경도 시험기를 사용하였으며, 측정하중 500gf, 하중시간 10sec 조건으로 용접부 단면의 횡방향으로 0.5mm 간격으로 경도를 측정하였다. Fig 3.4와 Tabel 3.4은 비커스경도 시험기 및 시험기 타입을 나타낸 것이다.



Fig. 3.4 Micro vickers hardness tester

Table. 3.4 Micro vickers hardness tester

	Values
Model	Akashi HM-112
Type	Micro vickers hardness tester
Load	0.5 kgf
Loading time	10 sec

3.6 미세조직 관찰

3.6.1 광학현미경

레이저 스티치 용접을 적용한 아연도금강판 SGARC340 접합부의 미세조직 분석을 위하여 접합부의 횡단면을 광학현미경으로 관찰하였다. 광학현미경을 통한 접합부의 조직을 관찰하기 위해 시편을 절단하고 마운팅 하여 경면 연마작업을 실시하였다. 경면 연마작업을 마친 시편을 질산4%, 에탄올96%의 나이탈(Nital) 부식액을 이용하여 광학현미경으로 조건별 단면 미세조직 특성을 분석하였다. Fig 3.5은 본 실험에 사용된 OLYMPUS사의 광학 현미경을 나타낸 것이다.



Fig. 3.5 Optical Microscope

3.6.1 주사현미경(SEM)

SU500 SEM은 HITACHI의 High-Tech에서 제조하는 고급 전자현미경으로, 고해상도와 대형 샘플 관찰이 가능하며, 빠른 이미지 획득 속도와 높은 안정성을 가지고 있다. 높은 가속 전압을 사용하여 세밀한 구조를 정밀하게 관찰할 수 있으며, 다양한 이미징 모드를 제공하여 다양한 샘플 유형에 적용 가능하다. 또한 EDS 및 EBSD와 같은 고급 분석 기능을 제공하여 원소 구성 및 결정 구조를 분석할 수 있다. 사용자 친화적인 인터페이스를 갖추어 사용이 쉽고 효율적인 실험과 분석을 가능하게 한다. 다양한 분야에서 연구, 개발, 품질 관리 등에 활용되는 선진적인 SEM 장비이다.



Fig. 3.6 HITACHI(社)의 SU5000 주사전자현미경(SEM)

3.7 비파괴 검사

3.7.1 방사선투과 검사

방사선 투과 시험은 Dandong Huar i社 XXG-3005기를 사용하였으며, 용량은 170-300(kv) / 5mA, 노출시간 15초, 선원-시험체 최소거리 500mm, 농도 1.0~4.0으로 설정하여 검사를 진행하였다.



Fig. 3.7 Dandong Huar i社 XXG-3005 방사선 투과 시험 장비

3.7.2 액상침투탐상 검사

액상 침투 탐상 검사는 KS B 0816 규격에 의거하여 침투제를 시험면에 스프레이로 분사하여 15분간 침투한 후 다시 세척제로 스프레이 분사해서 이물질 제거 후, 15분간의 흡출한 후 평가 시험하였으며 하기 표를 기준으로 시험 수행하였다.

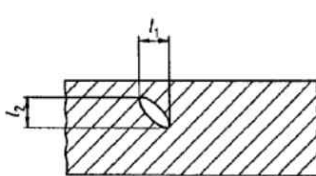
Table 3.5 액상 침투 탐상 검사 시험 방법

평가방법	KS B 0816		
	침 투 제	세 척 제	현 상 제
구 분			
종 류	NPP2	NPR1-3	NPD4
적 용	Brush	Hand wipe	Spray
침투시간	15분	N/A	15분

3.8 EN ISO(13919-1) 규격

공정변수에 따른 최적의 용접조건을 결정하기 위해 판재에 대한 Bead On Plate (BOP) 용접을 초점거리에 따라 실시하였고, 건전한 용접부 및 종횡비가 큰 초점거리를 기준으로 출력과 초점거리를 변화시켜 용접을 진행하였다. 공정변수에 따른 레이저 용접부의 용접 특성을 용접부 결함 평가 규격(EN ISO 13191-1)에 의거하여 미세결함 등급을 평가하였으며, 비드 평가 특성을 4가지(Reinforcement, Under cut, Back bead, Continuity of bead width)로 구분하여 4단계로 평가하였다.

Table 3.6 레이저 용접부 결함 평가 기준

Imperfection designation	Limits for imperfections for quality levels		
	Modeater (D)	Intermediate (C)	Stringent (B)
Porosity and gas pores	$h \leq 0.5 t$ or 5 mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.4 t$ or 3 mm, Whichever is the smaller	$h \leq 0.3 t$ or 2 mm, Whichever is the smaller
	<p>The following conditions and limits for imperfections shall be fulfilled:</p> <p>a) Maximum dimension $l(l_1, l_2$ or h) for single pore.</p> <p>b) Maximum dimension of the summation of the projected area of the imperfections.</p> <p>Projection is in a direction parallel to the surface and perpendicular to the weld axis. It relates to an area t multiplied by weld length, where weld length is the actual length of the weld or 100 mm, whichever is the smaller</p>		
			

4장. 연구 결과

4.1 비파괴검사를 통한 용접부 결함 평가

4.1.1 방사선 투과 검사 결과

방사선 투과 검사 결과 Table 4.1과 같이 단독 레이저 스티치 용접부의 경우 P1, P2에서 내부결함인 다공성 기공이 발생 되었으며, 이는 용접부의 아연 증기 배출이 원활하지 않기 때문에 나타나는 것으로 사료된다.

반면, 본 연구를 통해 개발된 3단계 레이저 스티치 공정을 적용한 시험편에서는 초점거리 변화에 관계없이 건전한 용접부를 확보할 수 있었으며, 아연 증기로 인한 결함 제어에 효과가 있음을 확인하였다.

Table 4.1 단일 스티치 및 3단계 스티치 방사선 투과 검사 결과

용접 조건		방사선 투과 검사				평가 결과
단독 스티치	출력 : 2.4kW 용접 속도 : 35mm/s 초점 거리 : 20mm	P1 	P2 	P3 	P4 	다공성 기공 및 내부결함
3 단계 스티치	출력 : 2.4kW 용접속도 : 35mm/s 초점거리 : 20mm	P1 	P2 	P3 	P4 	특이사항 없음
	출력 : 2.4kW 용접속도 : 35mm/s 초점거리 : 25mm	P1 	P2 	P3 	P4 	특이사항 없음
	출력 : 2.4kW 용접속도 : 35mm/s 초점거리 : 30mm	P1 	P2 	P3 	P4 	특이사항 없음

4.1.2 액상침투 탐상 검사 결과

액상침투 탐상 검사 결과 Table 4.2와 같이 단독 레이저 스티치 용접부의 경우 마찬가지로 P1, P2에서 피트 등 표면결함 나타났으며, 이는 용접 과정 중 용융풀에서 방출되는 아연 증기에 기인된 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발된 3단계 레이저 스티치 용접을 적용한 시험편의 경우 아연 증기의 기화 현상 유도 및 배출 시간을 확보함에 따라 비드 표면에 결함 없는 건전한 용접부를 확보할 수 있었다.

Table 4.2 단독 스티치 및 3단계 스티치 액상침투 탐상 검사 결과

용접 조건		액상침투 탐상 검사				평가 결과
단독 스티치	출력 : 2.4kW 용접 속도 : 35mm/s 초점 거리 : 20mm					피트 등 표면 결함
3 단계 스티치	출력 : 2.4kW 용접 속도 : 35mm/s 초점거리 : 20mm					특이사항 없음
	출력 : 2.4kW 용접 속도 : 35mm/s 초점거리 : 25mm					특이사항 없음
	출력 : 2.4kW 용접 속도 : 35mm/s 초점거리 : 30mm					특이사항 없음

4.2 공정변수에 따른 비드 특성

4.2.1 단독 스티치 vs. 3단계 스티치 비드 특성

공정변수에 따른 외관 및 단면 특성을 고찰하기 위해 ISO 13919-1 규격에 의거하여 용접부 외관 특성으로는 강화(Reinforcement), 이면 비드(Back bead) 및 언더컷(Undercut), 용접부 단면 특성으로는 입열량과 밀접한 관련이 있는 비드폭(Bead width), 용입깊이(Penetration), 열영향부(Heat Affected Zone) 및 용접부 강도와 직결되는 접합 계면(Interface) 및 기공(Porosity) 등을 주안점으로 고찰 하였다.

본 연구에 적용되는 3단계 레이저 스티치 용접은 1, 2, 3단계 공정으로 나누어져 있으며, 아연 증기 배출 단계인 1, 2단계 공정의 용접부 외관 및 단면 특성을 고찰하였다. Table 4.3와 같이 1단계와 2단계 용접부 외관에서 크게 차이가 없었으며 언더컷(Undercut) 및 기공(Porosity)은 관찰되지 않았다. 2단계 용접 시 입열량이 증가함에 따라 용입깊이가 1.377mm, 접합 계면 길이가 0.254mm, 열영향부가 0.219mm로 증가하였다.

단독 레이저 스티치 용접시 아연 증기 배출이 원활하게 되지 않아 비드 표면에서 기공(Porosity) 및 언더컷(Undercut)이 발생함. Table 4.4와 같이 아연 증기로 인하여 레이저 빔의 집속이 일정하지 않아 키홀(Keyhole) 형성이 불규칙하여 발생한 것으로 사료된다.

용접부 결함 평가 규격(EN ISO 13191-1)에 의거하여 결함 분석 결과, 단일 스티치 단면에서 관찰된 기공의 크기는 약 0.9mm로 품질 등급 B level에 해당된다.

Table 4.3 용접 단계별 용접부 외관 및 단면 사진

단계	표면 비드	이면 비드	단면
1			
2			




Table 4.4 용접 모드에 따른 용접부 외관 및 단면 사진

용접 모드	표면 비드	이면 비드	단면
단독 스티치			
3단계 스티치			

Table 4.5에 나타난 바와 같이, 출력 2.4kW, 초점거리 20mm의 단독 레이저 스티치 용접에서 비드 외관 관찰을 통한 용접부 결함인 Pit 결함의 개수를 측정하였다.

Pit 결함은 결함 면적이 1mm² 이상인 형상을 우선적으로 판별함. 1, 3번 비드 외관에서 원형 결함이 발견되었으며, 2번 비드 외관에서는 선형 결함과 원형 결함 결함 모두 발견되었다.

Table 4.5 용접부 외관 결함 관찰 및 분석

Bead No.	Bead appearance	Pit 개수
1		2
2		3
3		3

4.2.2 3단계 레이저 스티치 용접 비드 특성

Table 4.6를 보았을 때 출력이 증가함에 따라 하판까지 입열되었으며, 과입열 시 발생되는 언더컷이 발생하였다. 또한, 입열량이 증가하면 열영향부 및 용입깊이가 증가하였다.

Table 4.6 초점거리 20 mm 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 사진



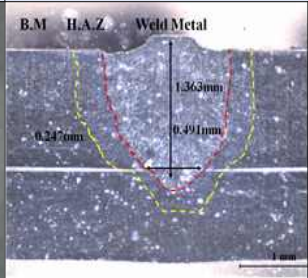


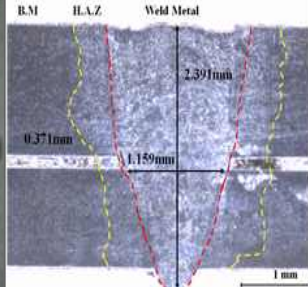


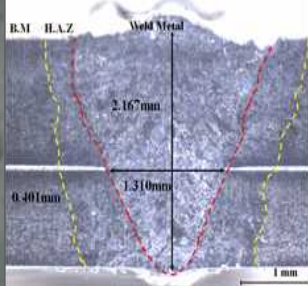
출력 [kW]	표면 비드	이면 비드	단면
2			
2.4			
2.8			

Table 4.7에 나타난 바와 같이 초점거리 20mm, 출력 2.4kW 및 초점거리 20mm, 출력 2.8kW 조건에서 비드 외관 평가 시 기공이 발생하지 않았으며 양호한 비드 외관을 확보하였으나, 단면 분석 시 언더컷이 관찰되었다. 이는 초점거리 20mm에서 출력 2.4kW, 2.8kW가 과입열 조건임을 알 수 있으며, 상대적으로 입열량이 감소한 조건인 초점거리 25mm, 출력 2.8kW에서 표에 나타난 바와 같이 양호한 용접부를 확보하였다.

Table 4.7 초점거리 25 mm 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 사진



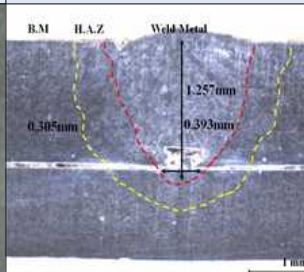


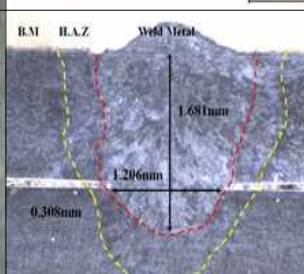


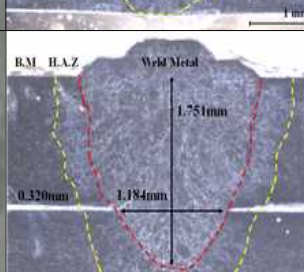




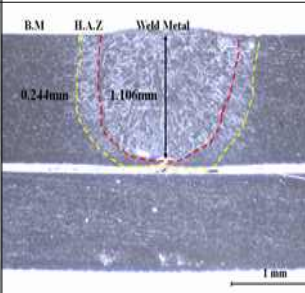


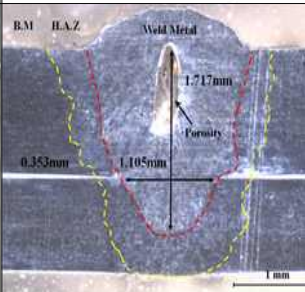
출력 [kW]	표면 비드	이면 비드	단면
2			
2.4			
2.8			

Table 4.8에 나타난 바와 같이 초점거리 30mm 및 출력 2kW, 2.4kW 조건에서 비드 외관 평가 시 기공 및 언더컷이 발생 되지 않았으나, 이면 비드가 형성되지 않았다. 출력 2kW 조건의 경우, 단면 평가 시 하판까지 용입이 되지 않았으며, 출력 2.4kW 조건의 경우 상판이 용융되어 하판 상부 표면에 용착되는 브레이징 용접의 형태로 접합되었다. 이는 용접 시 필요한 입열량이 충분히 확보되지 않은 것으로 사료된다.

Table 4.8 초점거리 30 mm 조건의 출력에 따른 용접부 외관 및 단면 사진

출력 [kW]	표면 비드	이면 비드	단면
2			Unweld
2.4			
2.8			

초점거리에 따른 용접부 외관을 고찰한 결과, 초점거리가 증가함에 따라 비드폭이 증가하였으며, 입열량 감소로 언더컷 발생 또한 감소하였다. 단면 평가 결과, 초점거리가 증가함에 따라 접합 계면이 증가하였으며, 용입깊이는 감소하였다. 이는 레이저 집속도 감소가 원인이며, 이로 인해 입열량이 감소하여 발생 되었다고 사료된다.

4.3 레이저 스티치 용접부 기계적 성능 평가

4.3.1 인장-전단 하중 평가

Fig. 4.1와 같이 단독 레이저 스티치 용접과 3단계 레이저 스티치 용접에 따른 인장전단 하중을 비교한 결과, 계면에서 파단이 발생하였으며, 3단계 스티치 용접이 10.1kN으로 약 36% 향상되었다. 이는 단일 스티치 경우 아연 제거가 충분히 이루어지지 않아 용접부 결함 등으로 인해 강도가 저하되었다고 판단된다.

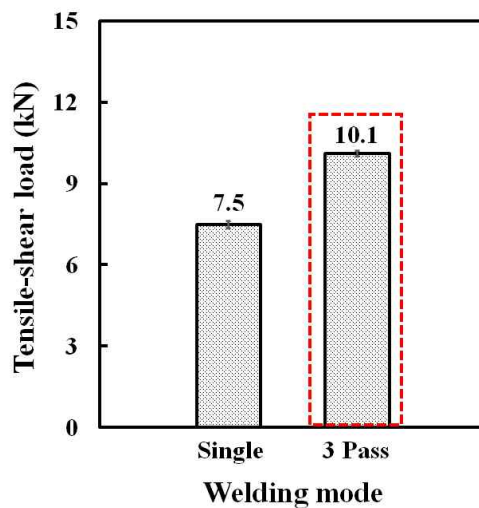


Fig. 4.1 초점거리 20 mm, 출력 2.4 kW 조건의 용접 모드에 따른 인장전단 강도 및 파단 형상

Fig. 4.2와 같이 초점거리 20mm 조건에서 출력별 인장강도를 비교한 결과, 충분한 용접 면적과 용입깊이 확보로 인해 최대 인장강도는 출력 2.8kW 일 때 10.2kN으로 확보하였다.

초점거리 25mm 조건의 경우, 출력에 따른 인장강도의 차이가 명확했으며, 최대 인장강도는 10.1kN 으로 출력 2.8kW 조건에서 나타났다.

초점거리 30mm 조건의 경우, 출력 2kW 조건은 용접이 되지 않았으며, 2.4 kW 조건은 2.7kN으로 다른 조건에 비해 강도값이 현저히 낮았으며, 최대 출력인 2.8kW

에서도 7.1kN으로 다른 조건에 비해 낮은 강도를 보이므로 초점거리 30mm 조건은 부적합하다고 사료된다.

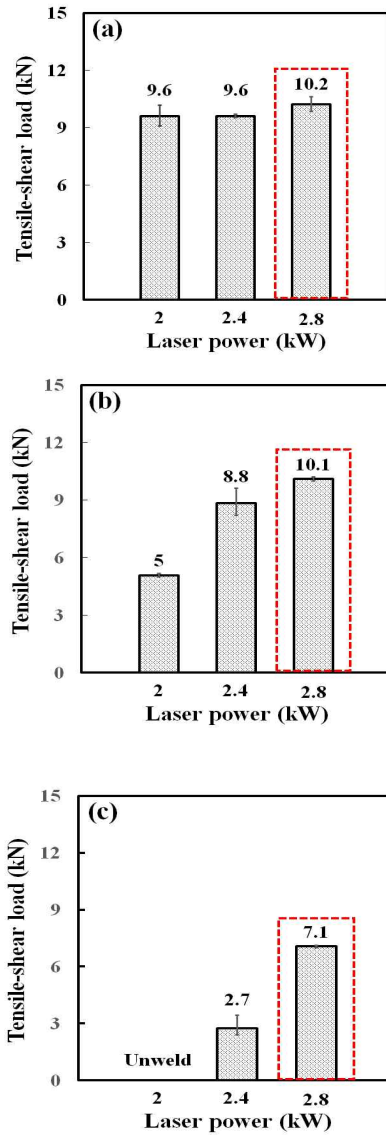


Fig. 4.2 초점거리에 따른 인장전단 강도 비교 : (a) 20mm, (b) 25mm, (c) 30mm

Fig. 4.3와 같이 모든 조건에서 계면 파단이 발생하였으며, 단면 분석 시 품질 평가 기준에 만족한 출력 2.4 kW, 초점거리 20mm 조건에서 피치에 따른 인장전단 하중을 나타내었다.

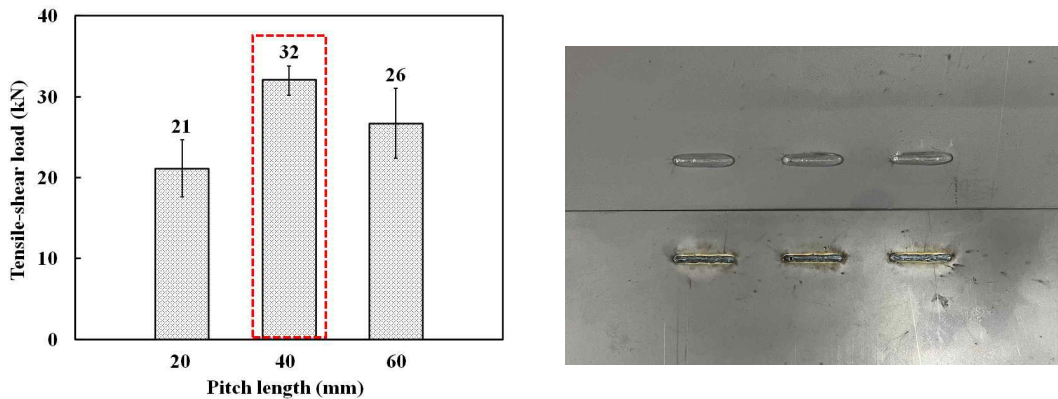


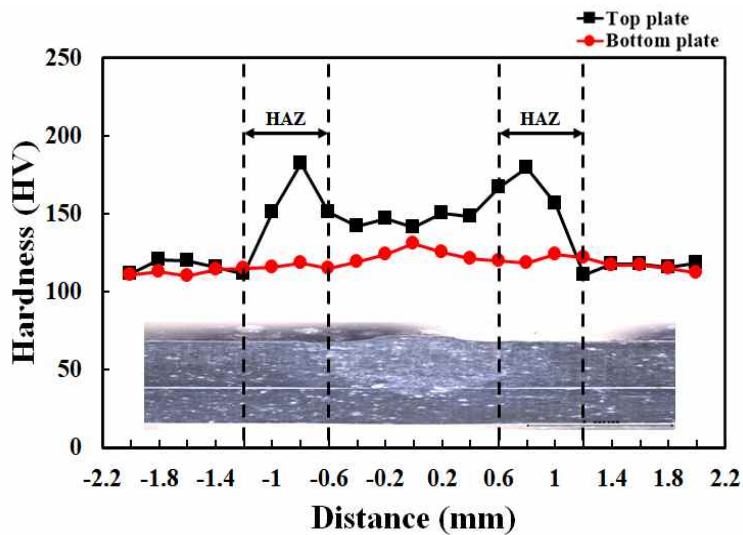
Fig. 4.3 초점거리 20 mm, 출력 2.4 kW 조건의 피치에 따른 인장전단 강도 및 계면 파단 모드

피치 40mm에서 최대 인장전단 하중값 32kN 이 나타났으며, 피치 20mm에서 가장 낮은 21kN이 나타남. 이는 피치 간격이 가까워짐에 따라 후행 용접에 의한 열영향이 증가하면서 용접부의 결정립 크기가 증가하여 강도가 저하되었다고 판단된다.

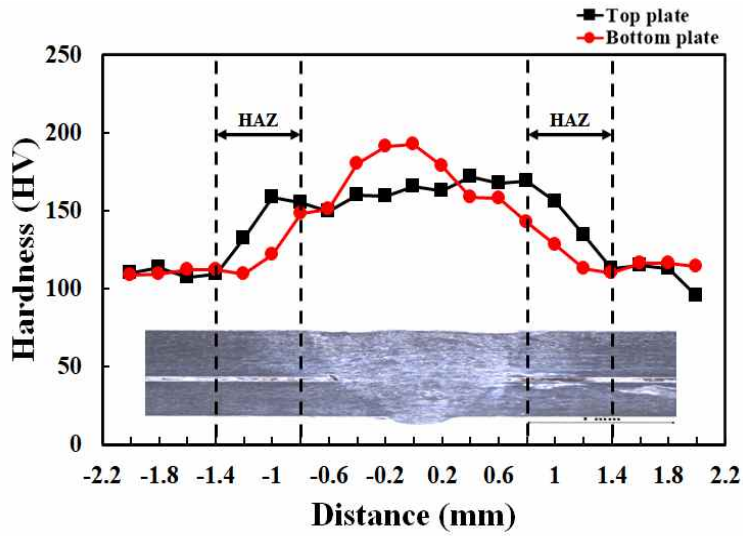
4.3.2 경도분포 특성

KS B ISO 22826 경도 시험 규격에 의거하여 공정변수별 경도 시험을 실시하였고, 초점거리 20mm에서 출력변화에 따른 용접부의 경도 분포를 Fig. 4.4에 나타냈다.

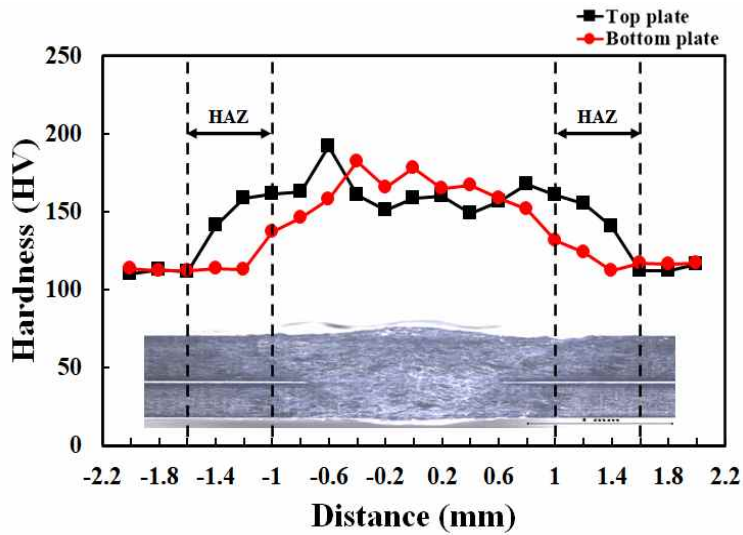
용접부의 경도 분포는 용접 시편의 상부 표면으로부터 용접부 단면의 횡방향으로 0.2mm 간격으로 측정하였으며, 용접부를 용융부, 열영향부로 구분하여 고찰하였다.



(a) 조건 1 : 출력 2.0 kW



(b) 조건 2 : 출력 2.4 kW



(c) 조건 3 : 출력 2.8 kW

Fig. 4.4 초점거리 20mm에서의 출력변화에 따른 용접부 경도 분포

3가지 조건의 용접부 경도 분포를 살펴보면, 용융부에서 경도가 급격히 증가하여 모재 대비 약 33% 정도 증가된 최대 경도값을 보이고 있으며 열영향부에서는 약 26% 정도 증가하는 특성을 보인다. 이는 레이저 용접의 적은 입열량과 빠른 냉각 속도 때문이라고 판단된다. 또한, 최대 경도값 모두 허용범위 안에 해당하는 값을 나타냈다.

조건 3에서 상판 기준 가장 높은 경도값은 191.9HV로 나타났으며, 하판 기준 192.4HV로 조건 2에서 나타내었다.

앞서 인장-전단 강도 시험 후 모두 하판에서 파단이 발생하였으며, 경도 분포에서 열영향부의 경도가 급격히 변화하는 구간이 존재하는데 그 구간인 열영향부와 모재 사이에서 파단이 발생했을 것으로 판단된다.

4.4 레이저 스티치 용접부 금속학적 특성 분석

4.4.1 용접부 영역별 미세조직 분석

용접부의 금속학적 특성을 평가하기 위해 광학현미경(Optical microscope)과 주사전자현미경(Scanning electron microscope)을 통해 용접부의 금속학적 특성을 고찰하였다. 최대 인장전단 하중이 갖는 조건 출력 2.8kW, 초점거리 20, 25mm와 단일 스티치 용접부의 미세조직 특성 비교하여 Table 4.9에 나타냈다. 각 조건의 용융부를 관찰하면 마르텐사이트 조직으로 이루어져 있으며, 응고조직의 특징으로 흔히 나타나는 주상정 형태를 보였다. 출력 2.8 kW 초점거리 20 mm의 경우 열영향부에서 결정립의 조대화 현상이 크게 나타나 용융부까지 이어져있는 모습을 보였으나, 출력 2.8 kW 초점거리 25 mm와 출력 2.4 kW 초점거리 20mm의 경우 상대적으로 낮은 열영향으로 결정립의 조대화 현상이 크게 발생되지 않았다.

Table 4.9 출력 2.8kW, 초점거리 20,25mm와 단독 스티치 용접부의 미세조직 관찰

구분	출력 [kW]	초점거리 [mm]	모재	열영향부	용융부
단일 스티치	2.4	20		결정립 조대화 	마르텐사이트 
3 pass 스티치	2.8	20		결정립 조대화 	마르텐사이트 
		25		결정립 조대화 	마르텐사이트 

4.4.2 SEM-EDS를 통한 용접부 성분 분석

Table 4.10에 나타난 바와 같이 용접부의 아연 제거 효과를 확인하기 위해 단독 레이저 스티치 용접부와 3단계 레이저 스티치 용접부에 대한 SEM-EDS 분석을 실시하였다. 또한, 측정된 위치는 상판 용융부, 접합계면, 하판 용융부로 총 3지점에서 Spot 분석을 실시하였다.

단독 레이저 스티치 용접부 단면에서는 아연 증기 혼입으로 인한 기공이 관찰되었으며, 아연(Zn)의 혼입량은 1.78%로 3단계 레이저 스티치 용접부의 접합계면에서 아연 혼입량은 0%로 아연 제거 효과를 확인할 수 있었다.

단독 레이저 스티치 용접부에서 아연 혼입량이 상판 1.41%, 하판 0.71%로 접합계면을 제외하고 상판에서의 아연 혼입량이 더 높게 나타나는데, 이는 잔류해 있는 아연이 용융플과 같이 용융되어 빠져나가지 못하고 기공으로 발생하였다. 따라서, 비드 용접부의 결함의 위치는 상판 비드에서 잔류해 있는 아연으로 인해 다량의 기공이 존재할 것으로 판단된다.

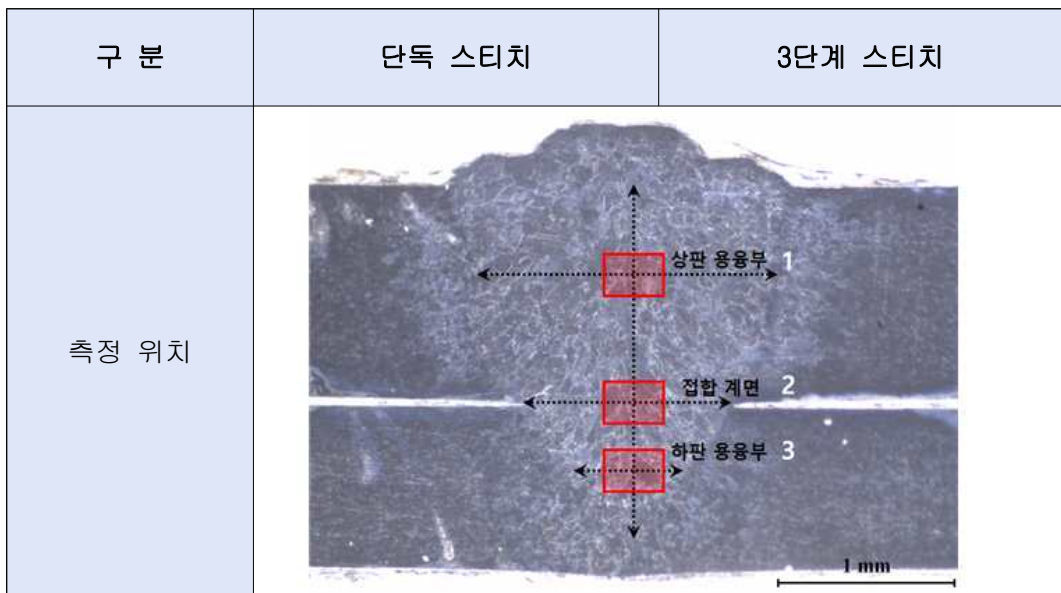
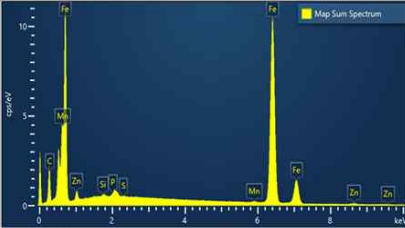
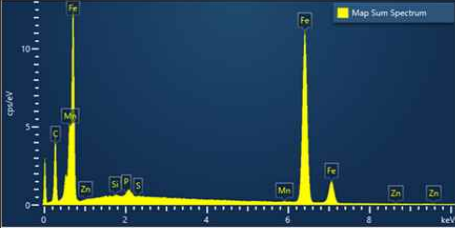
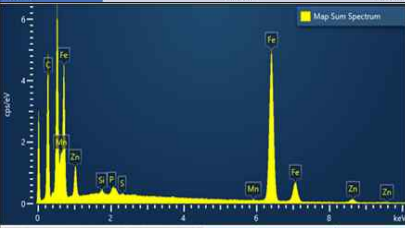

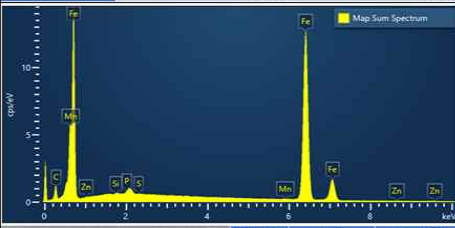
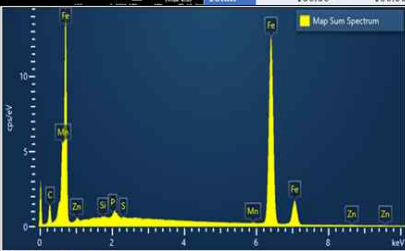
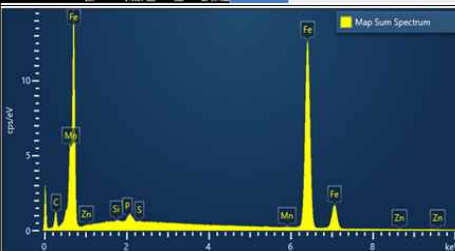


Fig. 4.5 단독 스티치 및 3단계 스티치 용접부의 SEM-EDS 측정 위치

Table 4.10 단독 스티치 및 3단계 스티치 용접부의 SEM-EDS 측정 결과

<p>1. 상판 용융부</p>	 <table border="1" data-bbox="334 685 738 859"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>19.37</td><td>52.84</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.11</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.06</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.33</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>77.31</td><td>45.36</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>2.82</td><td>1.41</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	19.37	52.84	Si	0.11	0.13	P	0.06	0.06	S	0.00	0.00	Mn	0.33	0.20	Fe	77.31	45.36	Zn	2.82	1.41	Total:	100.00	100.00	 <table border="1" data-bbox="746 685 1199 859"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>30.05</td><td>66.61</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.06</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.14</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>69.74</td><td>33.25</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	30.05	66.61	Si	0.06	0.06	P	0.00	0.00	S	0.00	0.00	Mn	0.14	0.07	Fe	69.74	33.25	Zn	0.00	0.00	Total:	100.00	100.00
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	19.37	52.84																																																						
Si	0.11	0.13																																																						
P	0.06	0.06																																																						
S	0.00	0.00																																																						
Mn	0.33	0.20																																																						
Fe	77.31	45.36																																																						
Zn	2.82	1.41																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	30.05	66.61																																																						
Si	0.06	0.06																																																						
P	0.00	0.00																																																						
S	0.00	0.00																																																						
Mn	0.14	0.07																																																						
Fe	69.74	33.25																																																						
Zn	0.00	0.00																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						
<p>2. 접합 계면</p>	  <table border="1" data-bbox="532 1085 738 1259"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>45.16</td><td>79.45</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.19</td><td>0.14</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.06</td><td>0.04</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.07</td><td>0.05</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.18</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>48.83</td><td>18.47</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>5.51</td><td>1.78</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	45.16	79.45	Si	0.19	0.14	P	0.06	0.04	S	0.07	0.05	Mn	0.18	0.07	Fe	48.83	18.47	Zn	5.51	1.78	Total:	100.00	100.00	 <table border="1" data-bbox="746 1085 1199 1259"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>10.73</td><td>34.96</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.06</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.18</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>89.02</td><td>64.80</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	10.73	34.96	Si	0.06	0.10	P	0.00	0.00	S	0.00	0.00	Mn	0.18	0.15	Fe	89.02	64.80	Zn	0.00	0.00	Total:	100.00	100.00
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	45.16	79.45																																																						
Si	0.19	0.14																																																						
P	0.06	0.04																																																						
S	0.07	0.05																																																						
Mn	0.18	0.07																																																						
Fe	48.83	18.47																																																						
Zn	5.51	1.78																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	10.73	34.96																																																						
Si	0.06	0.10																																																						
P	0.00	0.00																																																						
S	0.00	0.00																																																						
Mn	0.18	0.15																																																						
Fe	89.02	64.80																																																						
Zn	0.00	0.00																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						
<p>3. 하판 용융부</p>	 <table border="1" data-bbox="334 1508 738 1694"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>12.19</td><td>39.27</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.25</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>86.37</td><td>59.85</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>1.20</td><td>0.71</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	12.19	39.27	Si	0.00	0.00	P	0.00	0.00	S	0.00	0.00	Mn	0.25	0.18	Fe	86.37	59.85	Zn	1.20	0.71	Total:	100.00	100.00	 <table border="1" data-bbox="746 1508 1199 1694"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>Atomic %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C</td><td>10.73</td><td>35.84</td></tr> <tr><td>Si</td><td>0.06</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>P</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>S</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>0.18</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>89.02</td><td>63.93</td></tr> <tr><td>Zn</td><td>0.00</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>Total:</td><td>100.00</td><td>100.00</td></tr> </tbody> </table>	Element	Wt%	Atomic %	C	10.73	35.84	Si	0.06	0.09	P	0.00	0.00	S	0.00	0.00	Mn	0.18	0.13	Fe	89.02	63.93	Zn	0.00	0.00	Total:	100.00	100.00
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	12.19	39.27																																																						
Si	0.00	0.00																																																						
P	0.00	0.00																																																						
S	0.00	0.00																																																						
Mn	0.25	0.18																																																						
Fe	86.37	59.85																																																						
Zn	1.20	0.71																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						
Element	Wt%	Atomic %																																																						
C	10.73	35.84																																																						
Si	0.06	0.09																																																						
P	0.00	0.00																																																						
S	0.00	0.00																																																						
Mn	0.18	0.13																																																						
Fe	89.02	63.93																																																						
Zn	0.00	0.00																																																						
Total:	100.00	100.00																																																						

제 5 장. 결 론

본 연구에서는 아연 도금강판에 3단계 레이저 스티치 용접 공정을 최초로 적용하여 내외부 기공 및 결함을 최소화 하고 건전한 용접부를 확보하는 공정을 자동차용 카울 패널 용접에 관한 연구를 수행하였다. 연구 결과, 단독 레이저 스티치 대비 3단계 레이저 스티치 공정을 적용한 용접에서는 용접부 내부의 아연을 제거하여 단독 레이저 스티치 용접에서 발생하던 기공에 관한 결함이 현저히 개선된 것으로 파악된다. 이는 자동차용 카울 패널 뿐만 아니라 아연 도금강판이 적용되는 다른 산업군 적용이 가능하므로 기술적 파급효과가 클 것으로 예상된다.

단독 레이저 스티치 용접 대비 3단계 레이저 스티치 용접을 아연 도금강판에 적용한 결과 아래와 같은 결과를 도출 할 수 있었다.

1) 비드 특성 관찰 결과 3단계 레이저 스티치 용접의 경우 과용입 조건의 기공 및 언더컷이 발생하지 않았으며, 육안 확인 결과 미려한 비드가 형성된 것을 확인하였다.

2) 인장-전단 하중 결과, 출력 2.8kW, 초점거리 25mm에서 최대 인장전단 하중 10.1kN을 확보하였고 이는 단독 레이저 스티치 결과 대비 36% 향상된 결과값을 확인하였다.

3) SEM-EDS 분석 결과, 3단계 레이저 스티치 용접의 경우 아연 혼입량이 0.00%로 나타났으며 이는 3단계 레이저 스티치 용접을 통한 아연 제거 효과가 충분하다 판단된다.

4) 비파괴 검사결과 3단계 레이저 스티치의 경우 방사선 투과 검사에서는 내부 결함이 발생하지 않았으며, 액상침투탐상결과 에서도 피트 및 기공의 흔적이 발생하지 않았다.

참고문헌

- [1] Jo yun Hee, Bang Hee Soen
Optimization of the Process Parameter for the Quality Standard Prediction of the High Strength GA Steel CMT Welded Joint based on Machine Learning, Department of Welding and Joining Science Engineering, Graduate School of Chosun University, 2022
- [2] Lee sangil, Bang Hee Soen
A Study on the improvement of welding quality of CMT weldment for galvanized steel sheets(SGARC 440), 2016
- [3] Guo-cheng Zheng. Bang Hee Soen
Mechanical Characteristics on Welded Joints of Automotive Fender Apron by Nd:YAG Laser Stitch Welding, 2015
- [4] Go Bum S, Bang Hee Soen
Reduction Characteristics of Welding Residual Stress and Deformation in Welds by Heat Sink Welding, Department of Welding and Joining Science Engineering, Graduate School of Chosun University
- [5] Jae-Won Kim, Siva Prasad Murugan, Nam Hyun Kang, Yeong-Do Park
Study on the Effect of the Localized Electrode Degradation on Weldability During an Electrode Life Test in Resistance Spot Welding of Ultra-High strength Steel 대한금속 재료학회지 Vol 57, No11, 2019 pp715-725
- [6] 안영남, 김철희, GTA-GMA 하이브리드공정에 따른 자동차용 아연도금강판의 용접 부 기공감소 (1) - 선행 GTA의 영향, Journal of Welding and Joining, Vol. 34, 2016, pp48-54
- [7] 조상명, 김기정, 이병우, 아연도금강판에 대한 중첩펄스 MIG 용접에서의 파형 제어와 기공 발생 특성, Journal of KWJS, Vol.23 No.1, 2005
- [8] S. Izutani, K. Yamazaki, R. Suzuki, New Welding Process, "J-Solution™ Zn",

- Suitable for Galvanized Steel in the Automotive Industry, Kobelco, KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW NO. 32, 2013
- [9] H. Matsui, H. Suzuki and M. Yamada, Reduction of blowholes in high-speed arc welding of hot-dip galvanised steel sheets, *Welding International*, 12(6), 1998, pp432-439
- [10] H. Matsui and M. Yamada, Fundamental study of an arc welding procedure for hot-dip zinc-coated steel sheet, *Welding International*, 12(7), 1998, pp529-538
- [11] H. Matsui and S. Shionoya, Reduction of blowholes by vibration of the molten pool in arc welding of galvanised carbon steel sheet, *Welding International*, 12(12), 1998, 959-965
- [12] M. Uchinara, T. Taka, H. Miyazaki, Effect of Welding Conditions and Shielding Gas on Weldability of Zinc-Plated Steel, *Journal Welding Society*, 2, 1995, pp105-109
- [13] Young-Nam Ahn, Minjung Kang, Cheolhee Kim
Applicability Study of 2-pass Laser Welding on Galvanized Steel Sheets
Journal of Welding and Joining, Vol.34 No.4(2016) pp55-61
- [14] S. Yang, J. Wang, B. E. Carlson and J. Zhang, Vacuum-assisted laser welding of zinc-coated steel in a gap-free lap joint configuration, *Weld. J*, 92, (7), 2013, pp197-204
- [15] *Welding and Joining Handbook*, 1: Ferrous and Non-ferrous Alloys, Korean Welding and Joining Society, 2008, pp287-288
- [16] 이기동, 강상훈, 강민정, 이성, 현승균, 김철희, 머신러닝을 이용한 레이저 용접부의 모델링 Part I: Al/Cu 이종재료 겹치기 레이저용접부의 용입깊이, *J. Weld. Join.* 39(1), 2021, pp27-35
Effect of Wire Composition on Welding with Gap and Offset in Cold Metal Transfer (CMT) GMAW. *Journal of The Korean Welding & Joining Society*, Vol. 36, No 5, 2018, pp12-18

- [17] 강민정, 안영남, 김철희, Porosity Reduction during Gas Tungsten Arc-Gas Metal Arc Hybrid Welding of Zinc Coated Steel Sheets (I) - Effect of Preceding Gas Tungsten Arc, Journal of Welding and Joining. The Korean Welding and Joining Society, Vol. 34, 2016, pp40-7