creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266516

2018년 2월

석사학위 논문

Nd:YAG 레이저 용접을 이용한 이종소재 CFRP와 Steel의 용접 메카니즘에 대한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 우 성

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Nd:YAG 레이저 용접을 이용한 이종소재 CFRP와 Steel의 용접 메카니즘에 대한 연구

Study on welding mechanism for dissimilar materials of CFRP/steel by using Nd:YAG laser welding

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원
용접·접합과학공학과
최 우 성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Nd:YAG 레이저 용접을 이용한 이종소재 CFRP와 Steel의 용접 메카니즘에 대한 연구

지도교수 방 희 선
공동 지도교수 방 한 서

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로
제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원
용접·접합과학공학과
최 우 성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

최우성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 송국현 (인)

위 원 조선대학교 특임교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CONTENTS

List of Figures ····· IV
List of Tables ····· V
Abstract ····· VI

제 1장 서 론 ····· 1
1.1 연구 배경 및 목적 ····· 1
1.1.1 연구 배경 ····· 1
1.1.2 연구 목적 ····· 6

1.2 국내·외 기술 동향 ····· 7
1.2.1 CFRP의 부품화 ····· 7
1.2.2 CFRP/Steel 이종 소재 용접 기술 ····· 8
1.2.3 레이저 용접 기술 ····· 9
(1) 레이저 원리 ····· 9
(2) Nd:YAG 레이저 ····· 13

1.3 CFRP 및 아연도금/냉간압연강판 특징 ····· 15
1.3.1 탄소섬유 강화 플라스틱 ····· 15
1.3.2 아연도금강판 ····· 17
1.3.3 냉간압연강판 ····· 18

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2장 연구 방법 ····· 19
2.1 연구 방법 ····· 19

2.2 실험 방법 및 조건 ····· 20
2.2.1 사용 소재 및 시험편 ····· 20
2.2.2 용접 조건 ····· 23
2.2.3 실험 장비 ····· 26
2.2.4 용접부 특성 평가 ····· 28

2.3 유한요소법에 의한 열전도 및 열탄소성 해석 ····· 30
2.3.1 열전도 이론의 유한요소 정식화 ····· 30
2.3.2 레이저 용접 열원 모델 ····· 35
2.3.3 열탄소성 이론의 유한요소 정식화 ····· 37
(1) 용접 잔류응력 특성 ····· 37
(2) 3차원 열탄소성 유한요소정식 ····· 38
(3) 응력 - 변형률 관계 ····· 40

제 3장 CFRP/Steel의 Laser 용접부 특성 평가 ····· 43
3.1 용접 공정 변수 별 용접 특성 ····· 43
3.1.1 CFRP/SGAFC 590DP의 용접 특성 ····· 43
3.1.2 CFRP/SPFC 590DP의 용접 특성 ····· 48
3.1.3 표면조도 유무에 따른 용접 특성 ····· 55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4장 CFRP/Steel Laser 용접부의 온도 및 잔류응력 수치해석 57
4.1 수치해석 모델 및 조건 57
4.2 온도 분포 특성 58
4.3 용접 잔류응력 특성 61

제 5장 결 론 64

참고문헌 66

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Fig. 1.1 International energy outlook ····· 2
Fig. 1.2 Process of development in vehicle body materials composition ····· 3
Fig. 1.3 Influence of 10% weight reduction in car performance ····· 5
Fig. 1.4 Interaction of energy level and photon in process of absorbtion, spontaneous emission and stimulated emssion ····· 10
Fig. 1.5 Structure of lamp pumping for solid laser ····· 12
Fig. 1.6 Process of manufacturing carbon fiber ····· 16
Fig. 1.7 Procedure of manufacturing carbon fiber reinforced plastic ····· 16
Fig. 2.1 Dimensions of tensile test specimen ····· 21
Fig. 2.2 Zig system used for Nd:YAG laser welding ····· 23
Fig. 2.3 3kw Nd:YAG laser welding system ····· 26
Fig. 2.4 Shear-Tensile strength test machine ····· 28
Fig. 2.5 Surface profile test instrument ····· 29
Fig. 3.1 Tensile shear strength of CFRP/SGAFC depand on surface roughness fabricated in P : 600W, V : 3mm/s, Defocusing : 5, 10mm ····· 46
Fig. 3.2 Tensile strength of CFRP/SPFC depand on defocusing fabricated in P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 5 - 15mm ····· 51
Fig. 3.3 Tensile shear strength of CFRP/SPFC depand on welding speed fabricated in P : 1000W, V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 15mm ····· 52
Fig. 3.4 Tensile shear strength of CFRP/SPFC depand on surface roughness fabricated in P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 15mm ····· 53
Fig. 4.1 FE analysis model ····· 57
Fig. 4.2 Temperature distribution depand on welding speed ····· 59
Fig. 4.3 Distribution of welding residual stress generated in welded specimen 61
Fig. 4.4 Distribution of welding residual stress in direction of width of welded specimen ····· 62
Fig. 4.5 Distribution of welding residual stress along transverse welding direction ····· 63
Fig. 4.6 Distribution of welding residual stress along welding direction ····· 63

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Table

Table. 1.1 Goals of decrease on emission in primary countries ····· 3
Table. 1.2 Physical and optical characteristic of Nd:YAG crystal ····· 14
Table. 2.1 Mechanical and Thermal properties of CFRP(PA66) ····· 21
Table. 2.2 Chemical composition and mechanical property of SGAFC 590DP ···· 22
Table. 2.3 Chemical composition and mechanical property of SPFC 590DP ····· 22
Table. 2.4 Welding conditions for selection of laser power on CFRP/SGAFC, CFRP/SPFC ····· 25
Table. 2.5 Specification of Nd:YAG laser welding equipment ····· 27
Table. 3.1 Cross section of laser welding for SGAFC fabricated in P : 600W, V : 6~18mm/s ····· 44
Table. 3.2 Fractured interface of laser welding for CFRP/SGAFC fabricated in P : 600W, V : 3~7mm/s ····· 44
Table. 3.3 Cross section of laser welding for SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5, 6, 7mm/s ····· 49
Table. 3.4 Bead Characteristics of laser welding for SPFC and CFRP/SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5, 6, 7mm/s ····· 49
Table. 3.5 Bead and weld Interface Characteristics of CFRP/SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 15mm ····· 54
Table. 3.6 Cross section of specimens in accordance with surface roughness ···· 56
Table. 4.1 Comparison of temperature distribution between cross section of laser welding and numerical analysis ····· 60

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Study on welding mechanism for dissimilar materials of CFRP/steel by using Nd:YAG laser welding

Choi Woo-Seong
Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.
Co-Advisor : Prof. Bang, Han-Sur, Ph.D.
Department of Welding and Joining Science Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently, the world is faced with the environmental problem such as greenhouse gases which causes global warming. Automobile industries are trying to solve the problem by reducing the exhaust gas and improving fuel-efficiency. Various solutions have been being suggested by the main countries in Europe, Asia, Northern America. Among many suggested solutions, the most practical and efficient one is to reduce the weight of the automobile. The lightweight materials applied to automobile is HSS, AHSS, Magnesium, Aluminium, composite materials, etc. When the weight is reduced 10%, the fuel efficiency increases 8% and the amount of exhaust gases reduce about 4~6%.

The existing way of joining CFRP and Steel are adhesive bond and mechanical joining. Those two ways are used widely in automobile industries, however additional cost for bonds and rivets is occurred and they make the products weight incraese. To remove those weaknesses many researches about joining CFRP/Steel by laser welding have been progressed through the world.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

This study is focused on welding CFRP and Steel by laser heat source. For the experiment, PA66, thermalplastic resin has been used for CFRP and SGAFC 590DP and SPFC 590DP have been used for steel. BOP welding was processed to select proper laser power. To get proper condition of welding speed, the experiment was progressed on lapped steel. After observe Macro surface of the specimen by Optical microscope, dissimilar experiment was processed.

This study intends to apply laser welding by way of heat conduction welding as a bonding technique for dissimilar material CFRP - Steel. The materials used for the experiment are 1.5mm thick of CFRP and SPFC and 0.9mm thick of SGAFC. In this study, the weldability and welding mechanism was observed by Tensile - Shear strength test and also observed the heat flow through the specimen by numerical analysis.

The parameters that used for experiment are as follow. The common conditions for each CFRP/SGAFC and CFRP/SPFC are beam shape : circle and Tiling angle : 5°. Ar 98%, O2 2% mixed gas was used as shielding for the experiment and the amount of flow is 20L/min for SGAFC, 30L/min for SPFC. Other conditions such as laser power, welding speed and defocusing were changed because of different thickness of steel that used for the experiment.

The experiment for CFRP/SGAFC was processed under the conditions that follows. Laser power : 600W, Welding speed : 3mm/s, Shielding gas : 20L/min, Defocusing : 0, 5, 10mm, and 1.5 ~ 2.0㎛ of surface roughness was applied to compare the weldability. For CFRP/SPFC, the experiment conditions were P : 1000W, V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 0, 5, 15mm, Shielding gas : 30L/min.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

As a result of Tensile - Shear test for CFRP/SGAFC, the strength was different about 25% in accordance with surface roughness. Also the change of defocusing determined joined or fractured. The highest strength was 0.648kN in the condition of P : 600W, V : 3mm/s, Defocusing : 10mm, roughness : 1.5㎛ which is 0.028kN higher than 5mm of defocusing which is almost the same value of strength and 0.148kN higher than without surface roughness.

The result of Tensile - Shear test for CFRP/SPFC shows that the highest strength was 1.518kN in the condition of P : 1000W, V : 5mm/s, Defocusing : 15mm. Nevertheless, the highest strength occurred, lots of surface defects were occurred on bead characteristics due to excessive heat input. Because of the defects, the strength were not steady for welding speed of 5 and 6mm/s. In the condition of 7mm/s, the strength was 1.215kN which is 0.303kN lower than 5mm/s, but the value was steady and no defects occurred on bead.

In this study, the welding characteristic of dissimilar materials CFRP/Steel by laser heat source was observed. The temperature distribution was observed by numerical analysis and optical inspection was processed to get proper condition for the experiment. Also residual stress was analyzed by FEM analysis program to verify the distribution of residual stress and heat conduction.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

1.1.1 연구 배경

최근 환경 문제 해결 방안이 세계적으로 이슈가 되고, 이에 관련해서 미국과 유럽을 중심으로 차량의 연비와 배기가스 규제가 강화되고 있다. 이를 해결하기 위해 자동차 산업에서는 차량의 연비를 개선하고 안전성을 강화한 고성능, 고효율 차량의 기술개발이 진행되고 있다. 이에 따라 차량강판의 고강도화 및 복합소재 적용에 대한 연구가 끊임없이 이루어지고 있고 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP)과 Steel간 이종접합에 대한 관심이 급증하고 있다. CFRP는 1970년대부터 스포츠(낚싯대, 테니스 라켓, 골프 샤프트)와 항공 용도로 채용되기 시작했으며, 처음 CFRP의 차체 채용은 1979년 Ford가 발표한 LTD 세단(544KG 경량화)이 최초였다. 그 뒤 GM, BMW, TOYOTA, NISSAN이 채용했으나 비용과 가공 및 접합 상의 문제로 CFRP의 본격적인 차체 적용은 이루어지지 못하였다. 하지만 현재 자동차 산업의 발전과 환경 문제 해결을 위해 CFRP의 차체 강판 적용을 위한 연구는 불가피한 상황이다.

CFRP(Carbon Fiber-Reinforced Plastic, 탄소섬유 강화 플라스틱)는 강화재에 탄소섬유를 이용한 섬유 강화 플라스틱이다. 탄소섬유는 철과 비교해 비중이 1/4이지만, 강도는 10배 정도 되는 뛰어난 특성을 가지고 있다. 탄소섬유가 그대로 이용되는 것은 극히 일부 용도에 한정되며, 대부분은 CFRP로서 이용되고 있다. 매트릭스(기재)에 열경화성 수지를 이용한 것을 강화 열경화성 플라스틱(CFRTS), 열가소성 수지를 이용한 것을 탄소섬유 강화 열가소성 플라스틱(CFRTP)이라고 부른다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

엔지니어링 플라스틱 계통인 PA66의 가장 큰 소비산업은 2012년 기준 자동차와 전기/전자 산업으로 계속해서 증가하고 있다. 유럽 지역의 전체 수요에서 자동차 산업이 55%를, 전기/전자 제품 산업이 22%를 차지했다. 세계 자동차용 탄소섬유 및 CFRP 수요량 예측 결과 2015년 기준 자동차용 탄소섬유 수요량은 6,000t, 자동차용 CFRP 수요량은 9,231t 이며 2025년에는 각 각 55,400t, 85,231t으로 급등할 것으로 예측하고 있다. PA66은 그 비강도가 우수하고, 내열성, 내후성 그리고 자원 절약성이 뛰어나 자동차 뿐 아니라 다양한 산업에서 매우 각광받는 소재이다. [1]

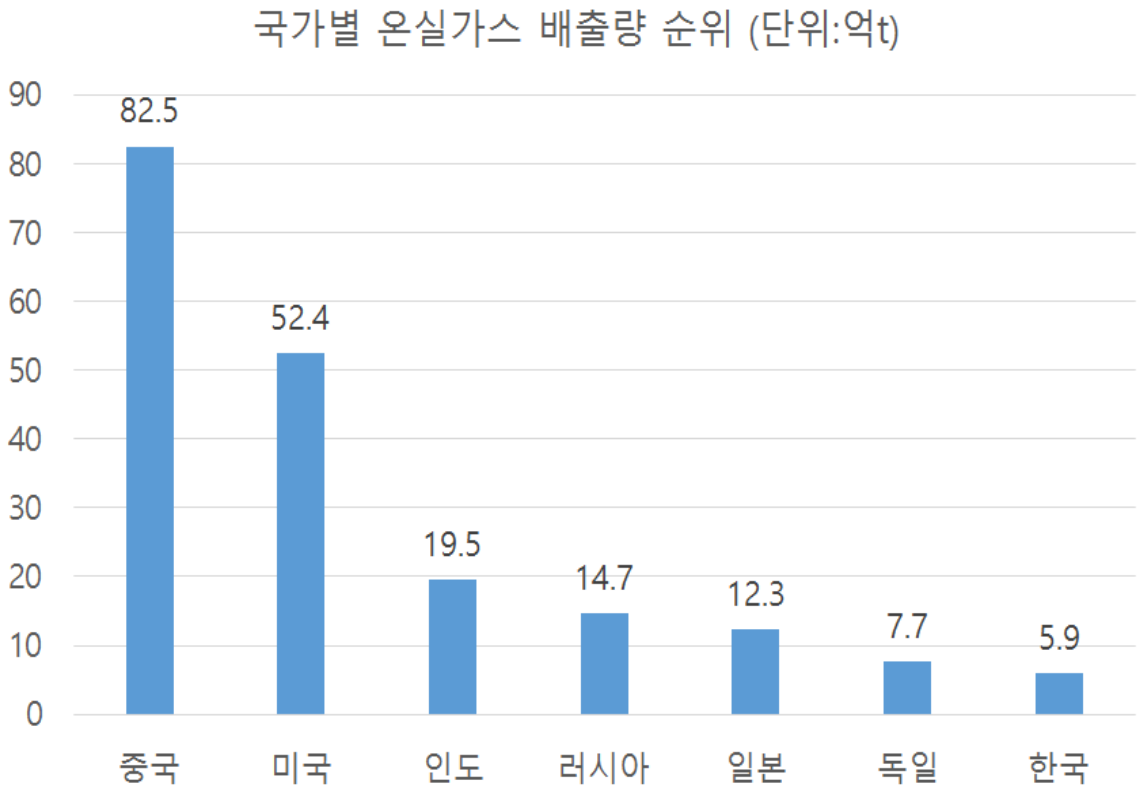


Fig. 1.1 International energy outlook

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1.1 Goals of decrease on emission in primary countries

한국	2030년 배출전망치 대비 37% 감축
미국(2025)	2005년 대비 26~28% 감축
중국	2005년 대비 60~65% 감축
일본	2013년 대비 26% 감축
유럽연합(EU)	1993년 대비 40% 감축
인도	2005년 대비 33~35% 감축
러시아	1990년 대비 25~30% 감축

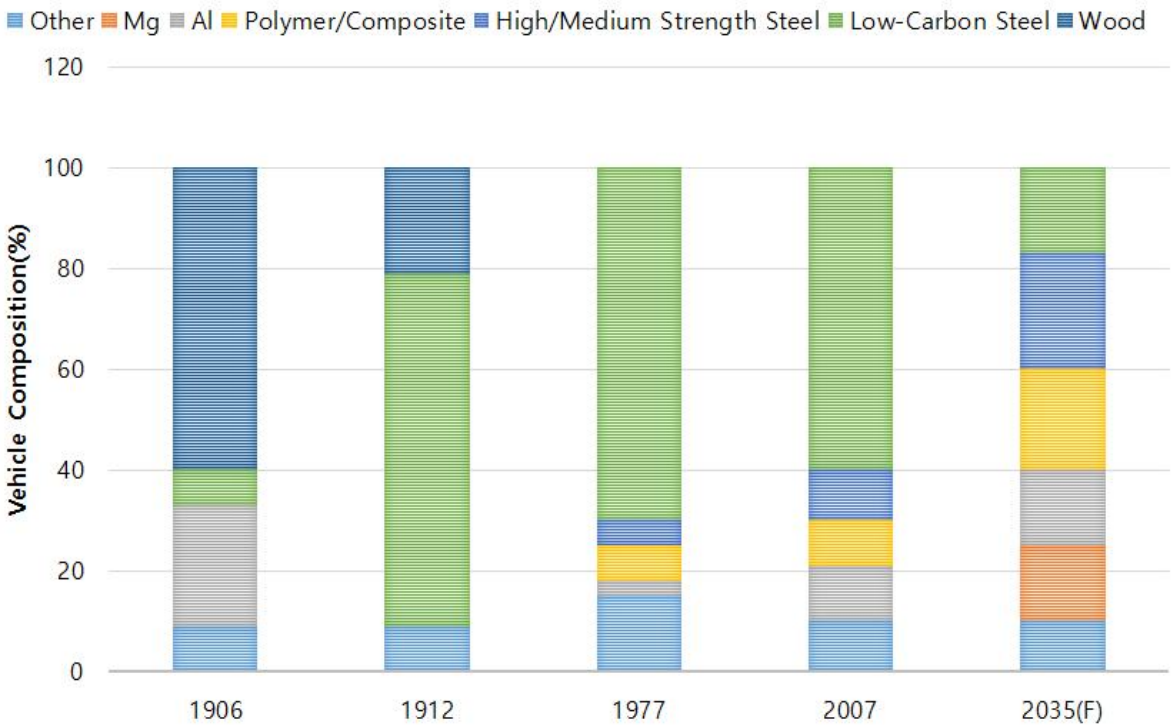


Fig. 1.2 Process of development in vehicle body materials composition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

주요 선진 국가들의 경우 자동차 연비 및 배기가스 규제를 강화함으로써 자동차 산업에서의 경량화 문제는 더 이상 선택이 아닌 생존하기 위한 필수 과제가 되었다. 자동차 경량화가 중요해지는 요인으로는 외부적인 요인과 내부적인 요인을 들 수 있다.

외부적인 요인은 앞서 언급했던 것과 같이 환경문제로 인한 연비규제이다. 미국 정부가 2012년 연비규제 강화 법안을 확정하면서 자동차 업체에서는 2025년까지 연비를 50% 이상 개선해야하는 상황에 놓였다. 그리고 국내에서도 EU를 비롯한 선진국 수준으로 연비 규제를 강화하고 있는 상황을 보면 국제적으로 연비규제가 더욱 강화될 것으로 보인다.

내부적인 요인으로는 고객 요구 또는 안전상의 문제로 인한 차량 중량의 증가를 들 수 있다. 현대 시대의 자동차는 전자제품이라는 말이 나올 정도로 수많은 기능과 고객의 편의를 위한 설비가 장착된다. 그로 인해 증가하는 부품이 원인으로 차량의 중량은 증가할 수밖에 없는 상황이다. 그리고 친환경 차량 또한 배터리를 비롯한 전용 부품들이 차지하는 무게 비율이 커 기존 차와 비교했을 때 중량을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다. 따라서 자동차 업체는 국제 환경 및 연비 규제와 소비자를 만족시키기 위해 차량의 중량 절감이 불가피한 상황이다. Fig. 1.3에서는 차체 경량화에 따른 자동차 성능 향상 빈도에 대해 나타낸 것이다. [2]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

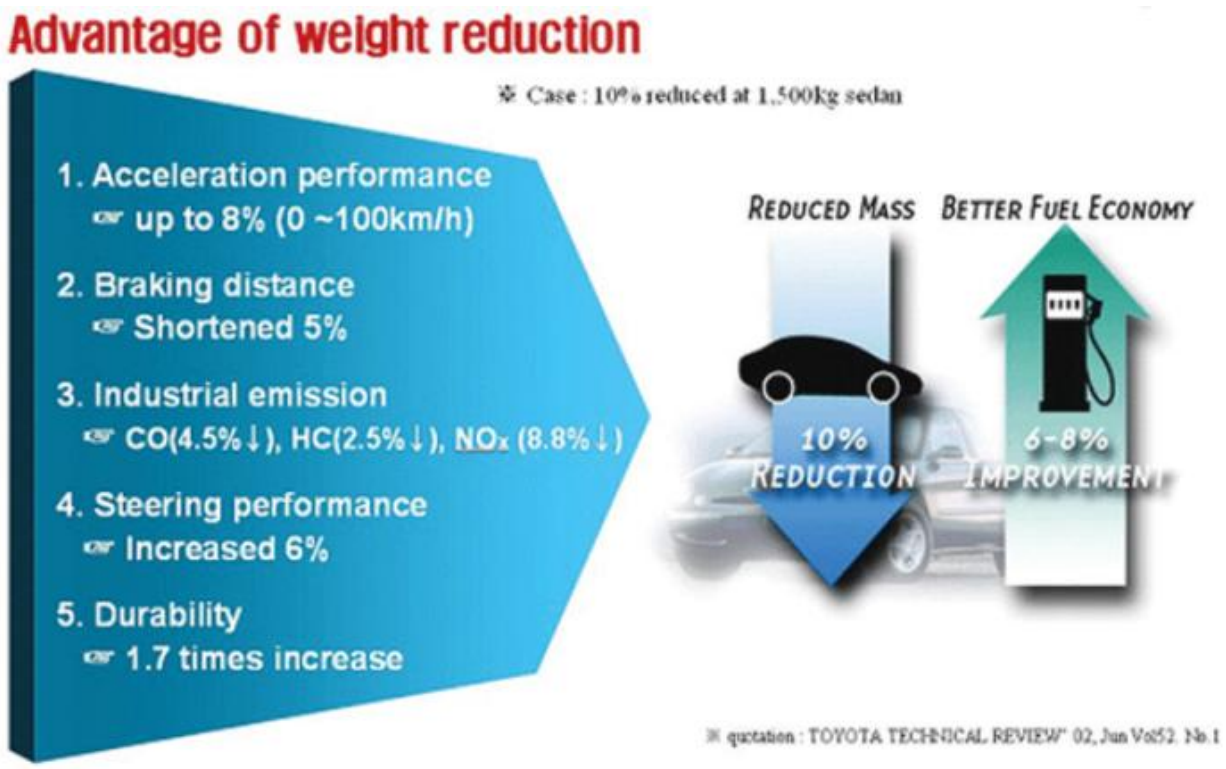


Fig. 1.3 Influence of 10% weight reduction in car performance

차량 경량화를 위해 자동차 산업에서는 알루미늄 합금, 복합소재와 같은 경량 소재의 사용이 증가하고 있지만 아직 철강 소재를 대체하기 까지 가격, 강도 등 해결해야 할 문제점을 많이 가지고 있다. 하지만 끊임없이 요구되는 차량 경량화 문제를 해결하고자 경량 소재의 접합 법에 대한 연구가 지속적으로 진행 되고 있다

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.1.2 연구 목적

CFRP 와 steel 이종재간 적용되고 있는 접합 방법은 플라스틱의 종류(열경화성 혹은 열가소성, 열가소성의 경우에는 결정성 혹은 비정질성), 형상(필름, 시트, 성형품), 접합하는 상대 재료, 요구 특성 등에 따라 다르며 그 방법으로는 크게 기계적 체결 법, 접착 법, 융착 법(용접 법)이 있다.

기계적 체결 법은 탈착을 자유롭게 할 수 있고 플라스틱의 종류에 관여하지 않고 적용 가능하지만, 플라스틱은 금속과 비교하여 탄성이 낮고, 경도, 강성이 부족하기 때문에 부하가 걸리는 부위에서는 적용할 수 없다. 접착법은 다양한 형상의 플라스틱, 이종재료와의 접합이 가능하다는 이점이 있으나, 일부 열가소성 플라스틱에 대해서는 표면처리를 할 필요가 있고, 순간접착제를 사용하는 경우 2초만에 접합이 가능하지만 최대강도에 도달하는 시간은 24시간 이후로, 다른 접합법과 비교하여 완전한 접합재를 얻기 위해서는 시간이 소요된다. 융착법은 열가소성 플라스틱에 한정하여 사용되며 단시간에 접합할 수 있고 접합 강도가 크다. 방법은 직접 용접법과 간접 용접법이 있으며, 이들 방법은 플라스틱의 종류에 따라서도 제약을 받는다. 섬유강화 열가소성 플라스틱인 경우 융착시에 섬유 배열이 어긋나서 강도가 저하한다. [3]

현재 산업에서는 접착제를 이용한 접착법과 SPR과 같은 기계적 체결법이 보편적으로 사용되고 있다. 하지만 두 가지 방법 모두 접착제와 리벳의 추가적인 재료에 의한 재료비와 이로 인해 발생하는 제품의 중량이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완하기 위해 추가적인 재료 없이 접합이 가능하게하기 위한 방법으로 용접 법을 적용하고 그 중 제살 용접인 레이저 용접을 도입하여 기존 접합법이 가지는 단점을 보완하고자 한다. 또한, 앞으로 CFRP와 금속간 용접성 검토를 통해 이종소재의 용접 메카니즘에 대해 연구하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 국내·외 기술 동향

1.2.1 CFRP의 부품화

앞으로의 자동차 산업의 발전 방향은 앞서 언급 했듯이 국제 환경규제에 만족하는 친환경 소재를 접목시켜 경량화 된 차량 개발에 초점이 맞춰져 있다. 그렇기에 알루미늄이나 CFRP와 같은 경량 소재가 철강재를 대체하고 있고, 그 물량이 점차 증가하고 있다. 토레이 발표 자료에 따르면 1380kg의 준 중형차에 CFRP를 최대한 적용 했을 때 차체 중량을 970kg(30%)까지 줄일 수 있다고 했다. 그 적용 범위는 일반적인 자동차용 고분자 재료는 핸들, 커버류, Instrument panel 등 내외장재가 주를 이루는 반면 고분자 복합 재료는 Hood, Door, Trunk lid, Roof, Wheel 등 차체 외판에 이용되고 있다. [4]

현재 CFRP를 가장 많이 도입하고 있는 글로벌 브랜드로는 BMW를 들 수 있다. 고성능 차량인 M 시리즈와 친 환경 차량인 i 시리즈에 적용하고 있으며, CFRP로 제작한 M4의 트렁크리드는 무게를 50% 절감 시켰고, 순수 전기차인 i3의 경우 차체(라이프 모듈)의 중량이 388kg으로 비슷한 등급 차량의 평균인 450kg과 비교했을 때, 그 중량이 상당히 절감 된 것을 볼 수 있다. BMW사 i3 모델 차체의 대부분은 구성품이 폴리 우레탄 (Polyurethane, PU) 접착제를 이용한 접착 조인트이다. 부분적으로 기계적 체결을 사용하기도 하였으나, 도어, 보넷, 및 외부/내부 패널 등 비구조 부재의 연결에 적용 되었으며, 차체 구조를 연결하는 구조 접합에는 거의 모든 부분이 접착제를 이용하거나 또는 볼트와 폴리 우레탄 접착제를 함께 사용한 하이브리드 조인트를 적용하고 있다. [5]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2.2 CFRP-Steel 이종소재 용접 기술

CFRP가 경량화를 위한 최적의 소재인 것은 사실이나, 당장 차체에 적용하는 데에는 그 가격이 비싸고 공정시간이 길다는 단점이 있다. kg당 약 20달러로, 철강 1달러, 알루미늄 3달러, 마그네슘 17달러에 비해 훨씬 비싸기 때문에 일반 대중 차량에 도입하기에는 현실적으로 제한적인 부분이 많다. 그로 인해 슈퍼 카와 프리미엄 브랜드에 많은 부분 적용되고 있으며, 그 값은 일반인들이 넘보기에는 터무니없이 비싸다. 이를 보완하기 위해 점차적으로 그 적용 범위를 슈퍼 카에서 친환경 차량으로 넓히고 있으며, 이는 점차적으로 그 범위가 확산 될 전망이다. [6]

값 비싼 재료임에도 불구하고 지속적으로 증가해가는 CFRP의 수요에 따라 그 접합 법에 대한 문제점도 함께 제시되고 있다. 접착법이나 기계적 체결 법이 널리 사용되고 있으나, 재료의 추가적인 비용과 그로 인해 발생하는 중량의 증가를 감수해야한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제시 된 것이 레이저 열원을 이용한 접합법이다.

레이저 용접법은 다른 용접법과 달리 집속도가 좋아 열 영향이 적고 그에 따른 변형이 비교적 없기 때문에 CFRP와 steel간의 이 종재 접합 방법으로 많은 연구가 진행 되고 있다. 현재 가장 현실적인 이종재 접합 방법으로 기계적 체결법과 접착법이 제시되고 있지만, 이 두 방법이 가지는 단점을 보완하기 위한 방법 중의 하나로 마찰교반용접을 비롯해 레이저 용접법이 제시되고 있는 상황이다. 현재 자동차, 항공 등 여러 분야에서의 CFRP의 수요가 증가함에 따라 그 용접 법 이외에 다른 접합 법에 대한 연구도 국내외로 지속적으로 진행되고 있다. [7]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2.3 레이저 용접 기술

(1) 레이저 원리

Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation (유도방출에 의한 빛의 증폭)의 앞글자로 이루어진 말로 물리 현상을 이용한 광원 장치를 말한다. 1958년 Bell 전화 연구소의 Schawlow와 Townes가 유도 방출에 의한 마이크로파의 증폭과 같은 원리로 광의 증폭, 발진현상이 일어난다고 발표하여 1960년 Hughes사의 Maiman이 루비를 사용하여 최초로 레이저 발진 실험에 성공하였다. 그 뒤 몇 년간 기제 레이저, 반도체 레이저가 발명되고 현재에는 레이저광의 파장역이 0.1㎛에서 수백㎛에 달하며, 출력은 연속발진으로 수백 kW, 펄스 발진에서 10^{12}W까지 이르고 있다. [8]

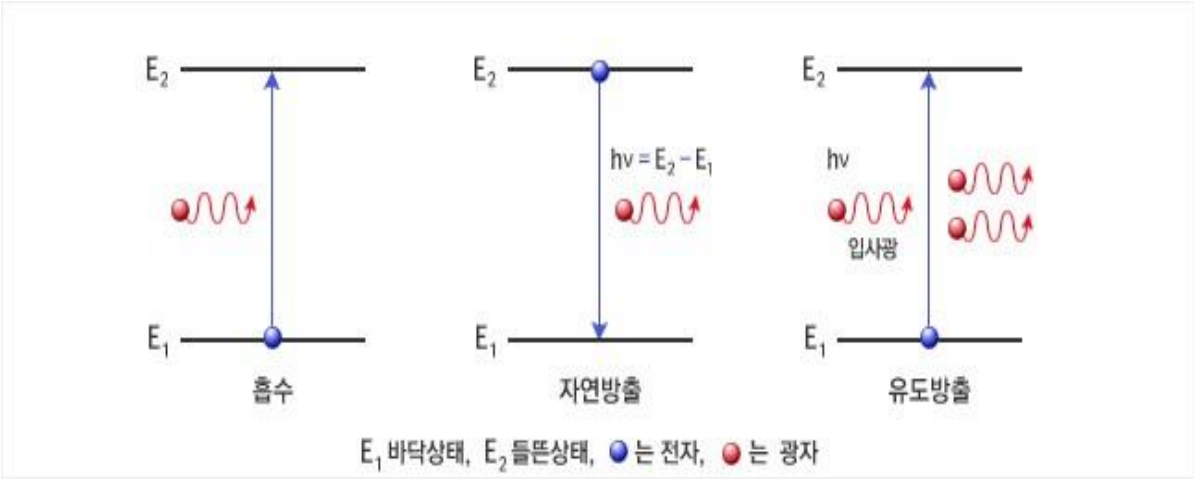
레이저의 발진 원리는 원자핵을 중심으로 그 주위에 전자가 돌고 있다. 원자의 에너지 준위는 전자가 최소의 에너지 값을 가지는 정상 궤도를 돌고 있을 때를 바닥상태(ground state), 외부에서 에너지를 얻어 정상궤도 보다 높은 궤도에 있을 때를 들뜬상태(excited state)에 있다고 말한다. 에너지를 얻어 들뜬상태(E2)에 있는 원자는 불안정하여 시간이 지나면 바닥상태(E1)로 되돌아가는 데, 이 때 방출되는 광자의 에너지는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$hv = E_2 - E_1$$

여기에서 E1, E2(E2>E1)는 각 에너지 준위이며 hν(h: 플랑크 상수, ν: 빛의 진동수)는 광자 에너지이다. 원자 또는 분자가 높은 에너지 상태에 있다가 낮은 에너지 상태로 떨어지면서 그 차이에 해당하는 빛을 스스로 방출하는데, 이 때 방출하는 빛은 파장, 위상, 방향이 일정하지 않은 빛을 방출한다. 이러한 방출을 자연방출이라고 한다. 백열등, 형광등과 같은 일반 빛의 대부분은 자연방출에 의한 빛이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



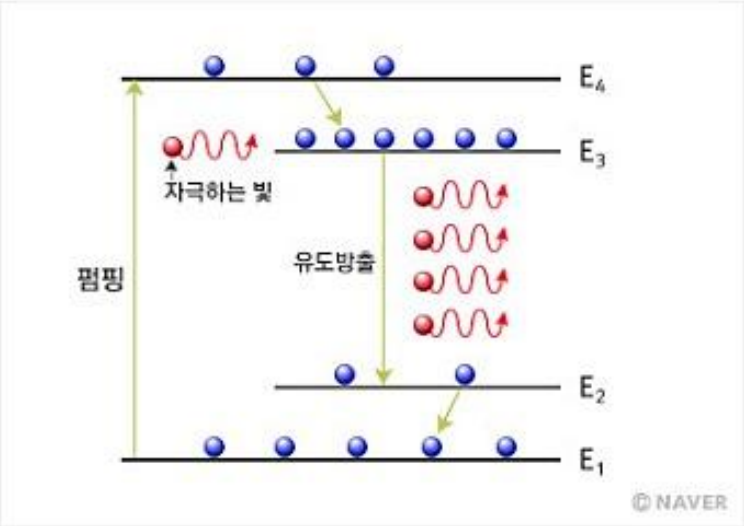


Fig. 1.4 Interaction of energy level and photon in process of absorbtion, spontaneous emission and stimulated emssion

레이저는 자연방출이 아닌 유도방출에 의해 발생하는 빛의 증폭이다. 유도 방출은 아인슈타인이 1917년 발표한 논문 '복사의 양자 이론'에서 처음 제시하였다. 바닥상태(E1)에 있는 원자 또는 분자가 펌핑(Pumping)에 의해 에너지를 흡수하면 들뜬 상태(E4)가 된다. E4에서 머무는 시간은 매우 짧아 곧바로 E3로 떨어진다. E3에서는 상대적으로 머무는 시간이 길어 준안정상태라고 하며, 여기에 많은 원자 또는 분자들이 모여 밀도반전 상태가 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 상태에 있는 원자 중 한 개가 자발적으로 빛을 내는 순간 여기서 방출된 빛이 주변의 다른 들뜬 원자 하나를 자극하여 E3에서 E2로 떨어지면서 빛을 방출하여 두 개의 광자가 된다. 또한 이 두 개의 광자는 다른 두 원자를 자극하여 4개가 된다. 이러한 연쇄반응이 일어나 파장이 같은 증폭된 빛을 방출하게 되는데 이 과정을 유도방출이라고 한다. 이 과정에서 자극하는 빛과 방출하는 빛의 파장은 같다. 그리고, E3에서 E2로 떨어진 원자는 E2에 머무르는 시간이 매우 짧아 곧바로 바닥상태(E1)로 떨어진다. [9]

유도방출에서 나오는 빛을 더욱 강한 빛으로 만드는 과정이 필요한데, 이 과정이 레이저발진 과정이다. 레이저발진을 하기 위하여 레이저봉 양쪽에 반사거울을 장치한다. 레이저봉 양쪽에 거울을 두는 것을 공진기라고 한다. 한쪽은 거의 100%를 반사하는 전반사 거울을, 다른 한쪽은 일부분의 빛이 투과할 수 있는 부분반사 거울을 장치한다. 위상과 파장이 같은 레이저봉에서 나온 빛이 양쪽 거울에 반사되어 무수히 왕복한다. 이 과정에서 차례로 유도방출이 생겨 빛이 증폭되거나 광학 부품에 의한 투과와 산란에 의해 손실되기도 한다. 레이저의 증폭 이득이 공진기의 손실보다 크면 레이저의 강도는 점점 증폭되어 부분반사 거울을 통과하여 빛이 나오게 되는데, 이 빛이 레이저이다. 이와 같이 레이저 빛은 발생과정에서 위상과 파장, 방향이 같은 나란한 빛만 나오므로 거의 퍼지지 않고 멀리까지 갈 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

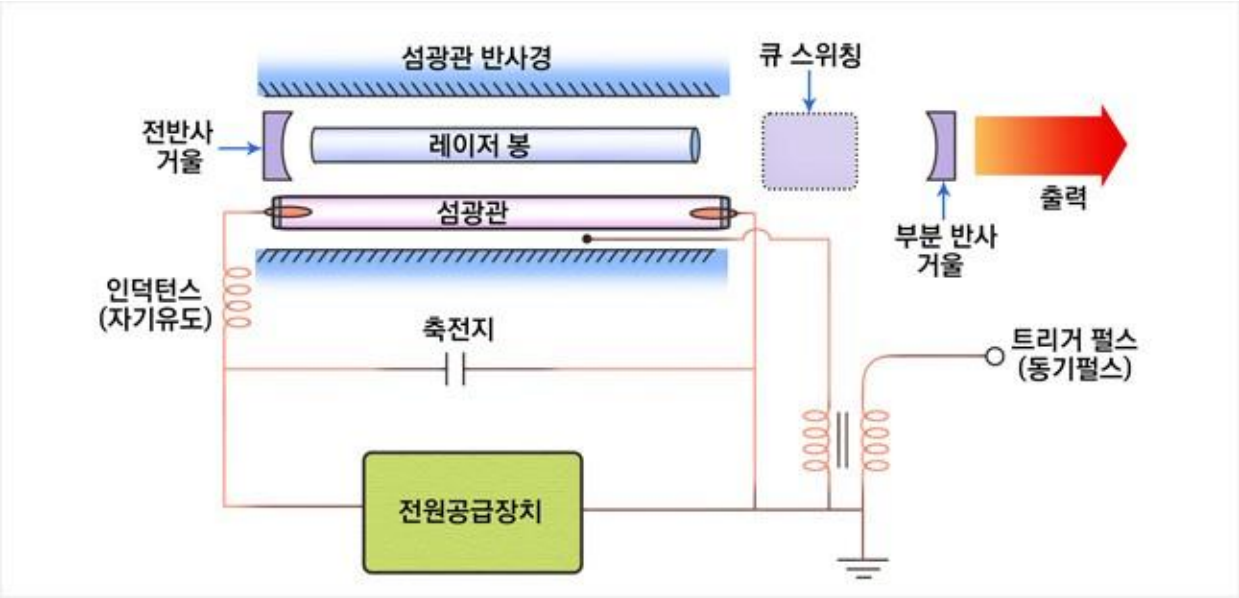


Fig. 1.5 Structure of lamp pumping for solid laser

Fig. 1.5에서 큐-스위칭은 일반적으로 공진기 내부의 기계식 또는 전자식 셔터에 의해 빛을 차단하거나 통과시키는 스위치 역할을 하는데, 레이저 발진이 조금씩 일어나지 않고 모아서 짧은 시간 동안 한꺼번에 매우 강한 빛이 나오게 하는 역할을 한다. [10]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) Nd:YAG 레이저

Nd:YAG는 연속발진과 펄스 발진 등 다양한 발진 형태로 널리 사용되고 있으며, 결정품질과 안정성 및 취급상의 용이성 등 산업용 고체재료로서 매우 우수하다. 1964년 미국의 Bell 연구소에서 Geusic등에 의해 발명된 Nd:YAG 레이저는 Nd^{3+}을 활성 이온으로 함유하는 YAG 결정이 여기에 의해 얻어지는 파장 1.06㎛의 강력한 근 적외광을 발진하는 고체 레이저이다.

Nd:YAG 결정의 물리적·광학적 특성을 Table 1.2에 정리하였다. YAG는 입방정구조를 가지며 융점은 1,950°C로 높다. 또 모스 경도 8~8.5로 단단한 재료이며 굴절율 n=1.82로 높은 무색 투명한 결정이다. YAG결정을 성장시켜 만든 작은 봉을 YAG 봉 혹은 YAG 로드(rod)라고 하고 Nd:YAG 레이저는 이 YAG 로드에 Nd^{3+}로 소량 도핑한 것을 레이저 매질로써 이용한다. 도핑한 YAG 결정은 연보라색을 띄며, YAG레이저는 파장 특성상 CO_2 레이저에 비해 금속표면에서의 반사율이 작기 때문에 CO_2 레이저로는 비교적 곤란하다고 여겨왔던 Cu, Al 등 고반사 재료의 가공에 쓸 수 있다. 또 단파장이기 때문에 집광성이 우수하고 미세가공에 적합하여 전자부품의 소형화에 따른 고밀도화, 고집적화에 대응한 마이크로 가공의 수요와 더불어 널리 사용되고 있다.

YAG 로드의 양단은 파장 λ의 0.1배 정도로 경면 연마하고 무반사 코팅처리 한다. 여기광이 로드 전체에 흡수되도록 측면은 불투명 글래스가 설치되어 있다. YAG 로드의 여기용 광원으로는 I-W램프, K-Hg 램프, Xe 아크 램프, Kr 아크램프 등이 있다. 램프 여기형 YAG 레이저에서는 이들 중에서 Kr 아크 램프가 비교적 수명이 길고 고휘도 발광이 가능하기 때문에 널리 사용되고 있다. YAG 레이저는 기본적으로 4준위 레이저이다. [11]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1.2 Physical and optical characteristic of Nd:YAG crystal

인자	특성
화학식	Nd : $Y_3Al_5O_{12}$
Nd^{3+}농도	~1%($Y_{2.79}Nd_{0.3}Al_5O_{12}$/0.725mass%)
Nd^{3+}이온수	$1.38 \times 10^{20}/cm^3$
융점	1,950°C
경도	1,215(Knoop), 8~8.5(Mohs)
밀도	$4.56g/cm^3$
열전도율	0.14W/cm · K
탄성률	300MPa
인장강도	130~260MPa
열충격계수	7~12W/cm
레이저천이 파장	1.064㎛
레이저천이	$^4F_{3/2}$
형광수명	230μs
유도산란단면적	$2\sim8.8 \times 10^{-19} cm^2$
굴절률 n	1.823
산란조건	0.2%/cm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3 CFRP 및 아연도금/냉간압연강판 특징

1.3.1 탄소섬유 강화 플라스틱

CFRP는 Carbon Fiber Reinforced Plastic의 약자로 카본섬유를 강화재로 하는 플라스틱을 의미한다. 아크릴 수지나 석유, 석탄에서 추출된 유기물을 섬유화 하고 특수 열처리 공정을 거쳐서 만들어지는 흑연 결정구조를 가진 섬유 모양의 탄소 물질이다. 주로 많이 사용되는 분야에는 자동차, 항공, 레저용품 등이 있다.

탄소섬유는 92%이상 탄소로 이루어진 섬유를 말하며, 그 제조방법과 원료에 따라 팬(PAN)계, 피치(Pitch)계, 레이온(Rayon)계로 나뉜다. PAN계 탄소섬유는 폴리아크릴로니트릴 섬유를 탄소화한 것으로 강도가 높아 다양한 분야에서 사용되고 있다. Pitch계 탄소섬유는 범용섬유라고 할 수 있다. 다른 섬유와는 다르게 타르 또는 석유 잔여물로부터 원료를 얻기 때문에 값이 비교적 저렴하며 뛰어난 열전도성을 살려 다양한 용도로 쓰인다. Rayon계 탄소섬유와 PAN계열 탄소섬유의 경우에는 물성을 조절하기 힘들다는 문제점 때문에 상용화 되지 못하고 있다.

CFRP는 열적 성질에 따라서 열가소성 수지와 열경화성 수지로 나뉘어진다. 또 그 용도에 따라 범용 수지, 엔지니어링 플라스틱, 특수 수지로 분류되고 있다. 열가소성 CFRP는 가열하면 일정 온도에서 용융하고, 냉각에 의해 다시 고체화되기 때문에 성형을 반복하는 것이 용이하다. 5대 범용 수지인 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리염화비닐, 폴리스틸렌, 아크릴 수지 외에 공중합체인 ABS 수지 및 열가소성 폴리 우레탄 등이 열가소성 수지이다. 한편 열경화성 수지는 한 번 가열에 의하여 경화하면 3차원 구조를 취하기 때문에 다시 가열하여도 연화, 용융하지 않으며, 대표적인 열경화성 수지로는 불포화 폴리에스테르, 에폭시 수지, 페놀수지 등이 있다. [12]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

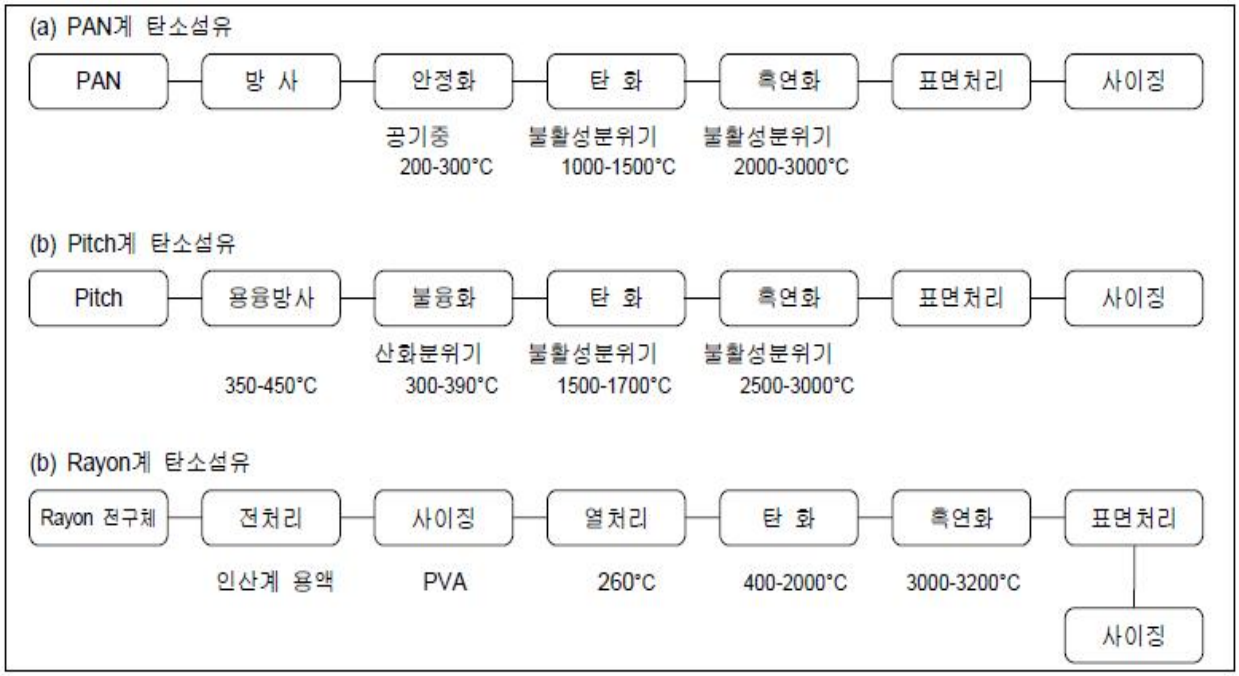


Fig. 1.6 Process of manufacturing carbon fiber

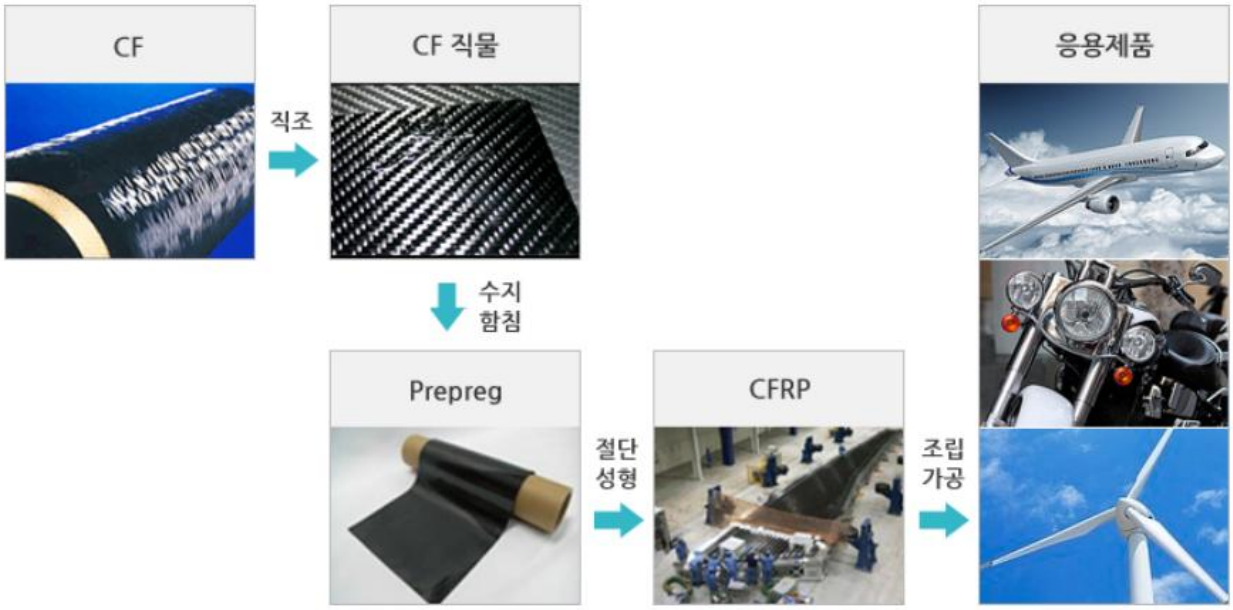


Fig. 1.7 Procedure of manufacturing carbon fiber reinforced plastic

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3.2 아연도금강판

강제의 아연도금은 상업적으로 스틸의 내 부식성을 고려하였을 때 가장 중요한 기술 중 하나이다. 아연도금강판은 크게 전기아연도금강판(EGI), 용융아연도금강판(GI), 합금화아연도금강판(GA)으로 나뉜다. 이중 자동차에 가장 많이 사용되는 제품은 합금화아연도금강판으로 용융아연도금강판의 용접성과 도장 후 내식성을 강화시키기 위해 용융아연도금 층을 재가열하여 만든다. 합금층은 약 10% 정도의 Fe를 함유하는 Fe-Zn으로 구성되어, 순수 아연에 비해 이온화 현상이 낮아 표면 부식에 보다 강하다. 이러한 특징 때문에 합금화아연도금강판은 자동차용 강판으로 가장 많이 적용되며, 일부 EGI대용으로 고내식성을 요구하는 가전제품에 사용되기도 한다. [13]

초 고장력강을 자동차에 적용 했을 때, 알루미늄 등 대체 소재보다 경제성은 물론 강도가 높아 특히 안전성 면에서 우수하다. 철은 가공성과 용접성이 뛰어나고 도금을 통해 부식을 방지할 수 있어 차체용 강판으로 최적의 소재고 꼽힌다. 또한 가공성이 뛰어나기 때문에 재활용이 용이해 환경 측면에서도 알루미늄과 같은 비철 재료에 비해 우수하다. 세계철강협회에 따르면 소재 1kg 생산 시 발생하는 탄소 배출량은 철 2~2.5kg, 알루미늄 11~12.6kg으로 알루미늄이 5배 정도 많다. 이러한 철의 장점을 감안해 개발된 것이 PosM-XF강, HPF강, TWIP강, DP강, CP강, FB강과 같은 기가스틸이다. 이 중 DP강은 페라이트 기지와 제2상인 마르텐사이트로 구성된다.

DP강은 0.5~0.6수준의 낮은 항복비를 가지므로 쉽게 가공할 수 있고, TRIP강 다음으로 높은 연신율을 나타낸다. 또한 소둔로에서 가열 후 급냉하고 Ms 온도이하에서 과시효대를 거치기 때문에 우수한 소부경화능을 갖는다. 생산제품은 인장강도 기준으로 490, 590, 780 및 980MPa 급으로 구분된다. 대게의 경우에는 용융도금강판(GI/GA)으로 제조되며, 냉연(CR) 및 열연(HR) 제품도 생산된다. [14]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3.3 냉간압연강판

냉연강판은 표면이 미려하고 가공성이 우수한 소재로, 냉장고, 세탁기 등 가정용품에서부터 산업기기, 각종 건자재 및 자동차에 이르기까지 다양한 용도로 사용되며 산업구조의 고도화에 따라 현대 사회의 필수 소재로 각광 받고 있다. 일반적으로 냉연강판은 열연 제품을 다시 일반 상온에서 압연하여 0.15mm ~ 3.2mm 정도 두께의 철판으로 이를 가열하지 않은 차가운 상태에서 가공한다고 해서 냉간압연강판 줄여서 냉연강판 이라고 한다.

냉연강판의 종류에는 일반냉연강판, HSS냉연강판, 구조용 강판, 용접봉용, 범랑용 강판, 내 황산용, 내 후성용 강판이 있으며, 일반 냉연강판은 냉장고도어, 드럼, 가구 제작에 쓰이고 자동차용으로는 Roof, Fender, Hood, Quarter, Spring House 등에 사용되며, 구조용 강판은 가공은 하지 않으나 강도가 요구되는 강구조물에 사용된다. HSS강판은 일반 냉연재보다 높은 강도가 필요하거나 강도와 더불어 가공성이 요구되는 제품에 사용된다. 용접봉용은 용접봉 뿐 아니라 극저온용(LNG,LPG tank류), 고 Mn 후판, 해양 구조용 강의 용접봉용 소재로 사용되는 등 냉연강판의 적용 범위는 현대 사회의 필수 소재라고 불릴 만큼 넓고 광범위하다. [15]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 연구 방법

2.1 연구 방법

1장에서는 본 연구를 진행하기에 앞서 연구 배경, 필요성, 공정의 원리, 소재의 특성 및 연구 목적에 대해서 나타내었다.

2장에서는 실험에 사용된 시험편, 실험 장비, 실험 방법 그리고 실험 조건에 대해서 언급하였고, 각 조건이 용접부 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위한 방법을 제시하였다. 용접 변수로는 레이저 출력, 용접 속도, 초점 위치, 보조가스 유량 등이 있다. 또한, 수치해석을 통한 열 분포 및 잔류응력 특성을 고찰하기 위해 해석에 대한 이론을 언급하였다.

3장에서는 용접부의 기계적 특성과 단면 특성을 분석 및 평가 하였다. 기계적 특성을 평가하기 위해 CFRP와 Steel의 제원을 현재 국내외로 많이 사용하고 있는 폭 2:3(CFRP : Steel) 비율로 가공하여 용접 한 뒤 인장 전단 시험을 진행하였다. 아울러 광학현미경(Optical microscope)을 이용하여 CFRP와 Steel의 접합 특성에 대해서 평가하였으며, 주안점은 표면 조도의 유무와 초점 위치에 따른 용접부 특성을 고찰하고자 한다.

4장에서는 수치해석을 통해 각 조건에서의 열 분포 특성과 실험 결과를 바탕으로 최적 조건에서의 용접 잔류응력의 특성을 파악하였다.

5장에서는 본 연구를 위해 진행된 실험과 수치해석에 대한 결론을 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 실험 방법 및 조건

2.2.1 사용 소재 및 시험편

본 연구에서는 경량화 소재인 CFRP(PA66)와 차체 구조용 강판인 아연도금강판(SGAFC 590DP)과 냉간압연강판(SPFC 590DP)을 steel로 사용하였다. CFRP의 물성은 Table 2.1에 나타내었다. PA66은 열 가소성 탄소섬유 강화 플라스틱으로 최저 온도 -30°C에서 최고 온도 130°C에 적용되며, 부식 및 열 과 화학반응에 대한 내성이 매우 뛰어나다.

아연도금강판으로는 SGAFC 590DP를 사용하였고, 자동차 이외에 가전제품에도 많은 부분 사용되고 있는 소재이다. 자동차에는 주로 부식 발생 빈도가 높은 차량 외판, Hood, 본닛 등에 많이 쓰인다. 아연도금강판의 물성치에 대한 정보는 Table 2.2에 나타내었다.

냉간압연강판은 SPFC 590DP를 사용 하였으며, 냉연강판 또한 자동차 이외에도 적용 분야가 다양하고 널리 사용되는 재료이다. 차체에는 아연도금강판과는 달리 외판이 아닌 내장재 프레임이나 커버로 사용되어진다. 냉간압연강판에 대한 물성 정보는 Table 2.3에 나타내었다.

이음 부 형상은 Fig. 2.1에 보이는 바와 같이 겹치기 용접을 진행하였고, 시편 사이즈 또한 그림과 같이 CFRP는 길이 80mm, 폭 20mm, 두께 1.5mm, Steel은 길이 80mm, 폭 30mm, 두께 0.9mm로 가공하였으며 겹침 부위는 40mm로 하여 실험을 진행하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

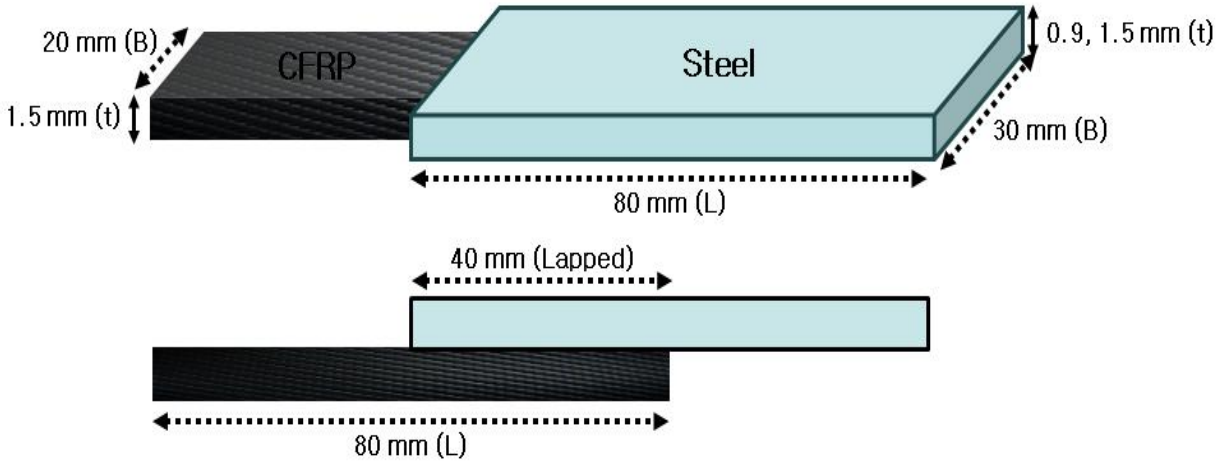


Fig. 2.1 Dimensions of tensile test specimen

Table. 2.1 Mechanical and Thermal properties of CFRP(PA66)

Material						
Reinforcement			Polymer	Laminate		
Fibres	Yarn (tex)	Weigh rate (%)	PA66	Density (g/cm^3)	Fibre content (% vol.)	Thickness Per layer (mm)
carbon	3k	50		1.43	45	.025

Mechanical properties			
Tensile Modulus (GPa)	Tensile stress(MPa)	Elongation(%)	Poisson's ratio
53.0	785	2.1	0.007

Thermal properties		
Melting temperature(℃)	Glass transition temperature(℃)	Heat deflection temperature(℃)
260	70	255

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 2.2 Chemical composition and mechanical property of SGAFC 590DP

Chemical Composition(%)						
Material	C	Mn	Si	P	S	Fe
SGAFC	0.1	2	0.2	0.03	0.003	Bal.

Mechanical properties			
Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SPFC 590	374	650	26

Table. 2.3 Chemical composition and mechanical property of SPFC 590DP

Chemical Composition(%)						
Material	C	Mn	Si	P	S	Fe
SPFC	0.1	2	0.2	0.03	0.003	Bal.

Mechanical properties			
Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SPFC 590	381	641	28

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.2 용접 조건

Fig. 2.2는 실험을 진행하기 위해 설치 된 지그의 모습을 보인 것이다. 레이저 용접의 경우 다른 아크 용접이나 마찰교반 용접에 비해 용접 속도가 빠르고, 집속도가 우수하여 열이나 압력에 의한 변형이 적다. 하지만 CFRP와 Steel 간의 이종재 접합 실험은 CFRP와 Steel의 열에 대한 반응을 고려하여야 한다. CFRP는 열에 의한 변형이 상대적으로 steel보다 적기 때문에 이종재 겹치기 용접을 수행할 시에 steel의 작은 열 변형이 용접부에 치명적일 수 있다. 그렇기 때문에 잔류응력으로 인한 변형을 최소화하기 위해 Fig. 2.2에서 보이는 바와 같이 zig system의 설정이 용접부에 매우 중요하게 작용한다.

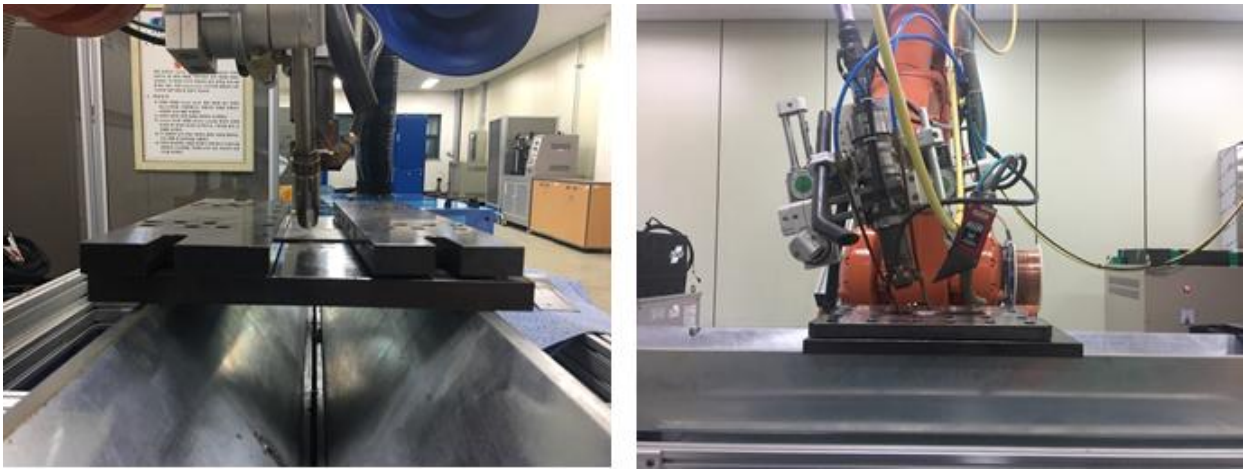


Fig. 2.2 Zig system used for Nd:YAG laser welding

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

CFRP/Steel 이종재 겹치기 용접을 진행하기에 앞서 먼저 실험 조건을 선정하기 위한 기초 실험을 진행하였다. 실험 조건은 레이저 출력, 용접속도, 초점위치, 초점 거리 등이 있다. 각 조건을 결정하기 위해 가장 먼저 해야 할 것은 먼저 초점거리 설정이다. 초점 거리를 설정하기 위해 시험편을 기울여 레이저를 조사한 후 비드 폭이 가장 좁은 점에서 렌즈까지의 거리가 최적 초점거리이다. 거기에서 시편이나 용접 방법에 따라 어느 초점 위치가 변경 될 수 있다.

레이저 출력을 결정하기 위해 아연도금강판의 경우 출력 : 400W, 600W, 800W 용접속도 : 10mm/s의 조건으로 BOP 용접을 진행하였다. 실험 후 용접부 단면 분석을 통해 입열량 차이에 따른 용접부의 용입 깊이 및 HAZ(Heat Affected Zone)의 영역 변화를 파악하여 레이저 출력을 고정한 뒤, 용접 속도를 선정하기 위해 속도에 변화를 주어 실험을 진행하였다. CFRP/Steel의 이종재 용접을 진행하기 위해 마지막으로 초점 위치 선정을 위해 앞서 도출된 레이저 출력과 용접 속도를 고정하고 초점위치를 변경하면서 최적 조건을 선정하고자 하였다.

냉연강판 SPFC는 아연도금강판보다 소재 두께가 두껍기 때문에 레이저 출력 조건을 선정할 때 더 높은 출력에서 실험을 진행하였다. 레이저 출력을 600W, 800W, 1000W, 용접 속도는 아연도금강판과 마찬가지로 10mm/s로 고정하여 실험을 진행하였으며, 앞서 진행했던 방법과 동일한 방법으로 실험 조건을 선정하였다.

아연도금강판과 냉연강판 모두 위에서 설명한 방법으로 실험 조건을 도출한 뒤, defocusing의 차이와 표면 조도 유무에 따른 용접부 강도 특성을 분석하였다 실험 조건은 Table. 2.4에 간단하게 나타냈다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 2.4 Welding conditions for CFRP/SGAFC, CFRP/SPFC

Welding condition	Values
Shielding Gas(ℓ/min)	30(Ar 98 : 02 2)
Defocusing(mm)	0
incident angle	5°

Materials / Conditions	SGAFC	SPFC
Laser Power (W)	600	1000
Welding Speed (mm/s)	3 - 7	5 - 8
Defocusing (mm)	0 - 10	0 - 15
Surface roughness	O, X	O, X

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.3 실험 장비

Fig. 2.3은 본 실험에 사용된 레이저 장비와 ABB사의 6-Axis로봇(IRB4400)의 사진이다. 레이저 용접기는 Trumpf사 모델명 HL3006D 장비로 연속파(CW : Continuous Wave) 3kw Nd:YAG Laser 용접 장비를 사용하였다. 본 Nd:YAG 레이저 장비의 최대 출력은 3kw, 빔 품질 25mm·mrad, 빔 형상은 원형 빔으로 구체적인 사양은 Table 2.5에 나타내었다.

본 연구에 사용된 티칭 로봇은 최대 속도 2m/s 이며 튼튼한 구조와 독특한 모션 컨트롤로 인해 짧은 주기 시간에 가속과 지연을 최적화 해주며 패스의 정확성과 위치 반복 정밀도가 우수하다.

장비 운용은 티칭 로봇에서의 명령을 통해 다음과 같은 절차로 실험이 진행된다. Safe Zone -> Start Point -> Laser On -> Laser stand by -> Laser shoot -> End Point -> Laser off -> Safe Zone 과 같은 과정을 통해 실험이 진행되며, 상황에 따라 실험 과정을 변경할 수 있다.

Fig. 2.3 3kw Nd:YAG laser welding system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2.5 Specification of Nd:YAG laser welding equipment

Model	HL3006D	
Type	CW Nd:YAG Laser	
Function	Unit	Spec.
Wave length of the laser light	nm	1064
Maximum output power	W	4000
Laser power applied to workpiece	W	3000
Minimum output power	W	30
Beam Parameter Product(BPP)	mm · mrad	25
Laser light cable	㎛	600
Length of laser light cable	m	30
Power consumption	kw	92
Cavity number	EA	6
Cooling water temp. range	℃	6-17
Weight	kg	3968
Dimensions W * H * D	mm	3850 x 1630 x 770
Ambient temp.	℃	10-40

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.4 용접부 특성 평가

CFRP(PA66)와 아연도금강판(SGAFC 590DP)의 레이저 용접시 시험편의 표면 거칠기와 초점위치의 차이에 따른 용접부 강도 특성을 고찰하기 위하여 전단 인장강도 시험을 진행하였다. Fig. 2.4는 본 시험에 사용된 만능 인장 시험기이다.

전단 인장 시험 평가 시, 앞서 Fig 2.1에 나타낸 것과 같이 시험편을 가공하여 실험한 뒤 강도 시험을 진행하였다. 복합소재와 철 이종재간 용접의 인장시험편 규격이 명백히 규격화 되어 있지 않기 때문에 현재 많이 사용되어 지고 있는 시험편 제원을 참고하여 진행하였다. [16]

Fig. 2.4 Shear - Tensile strength test Machine

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표면 조도의 유무, Defocusing의 차이가 용접부에 미치는 영향을 확인하기 위해 광학 현미경을 통한 단면 분석을 실시하였다. 이종소재 CFRP와 Steel간의 레이저 용접 진행시 Macro를 통해 Defocusing의 차이에 따른 열 분포 영역에 대해 파악하고 실험 조건을 설정하는데 참고하였다. 조도의 유무에 따른 차이를 확인하기 위해 단면 Micro 사진을 촬영하여, 조도에 따른 유동을 육안으로 확인하고 파단 계면의 형상에 따른 강도 차이를 분석하였다.

Fig. 2.5은 Amery Paper를 이용해 표면 조도를 부여하고 조도 깊이를 측정하기 위해 사용된 표면 조도 측정기이다. 거칠기 정도는 1 ~ 2㎛ 사이로 설정하여 부여하였고, 조도에 따른 강도 특성을 전단 인장 강도 시험을 통해 확인하였고, 단면 분석을 통해 그 차이를 비교하였다.

Fig. 2.5 Surface profile test instrument

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3 유한요소법에 의한 열전도 및 열탄소성 해석

2.3.1 열전도 이론의 유한요소 정식화

열전도 해석은 구조물의 온도 분포를 구하는 해석이다. 시간에 따라 온도 분포가 바뀌는 천이(Transient) 열전도 해석과 시간에 따라 온도 분포 변화가 없는 정상 상태(Steady state) 해석이 있다. 열전도 해석도 선형 해석과 비선형 해석이 있는데, 온도 해석의 비선형성으로는 온도에 따라 열전도도와 같은 물성치가 바뀌는 경우가 해당된다.

경계 조건으로는 온도 조건, 열 유속 조건이 있다. 온도 조건은 말 그대로 경계면에서 일정한 온도를 유지하는 조건이다. 유체와 접하는 경계의 열 유속 조건을 직접 지정하거나 열전달 계수와 유동 측 온도를 설정하는 방법이 있다. 단열 조건인 경우에는 열 유속이 0이 된다. 열전달 계수는 일반적으로 알려진 열 전달 계수(대류 열전달)나 간단한 수식으로도 구할 수 있으나 정확히 하려면 전산 유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 방법을 통한 유동 해석을 통하여 보여주는 것이 좋다. 그러나 전산 유체역학에서 구해지는 열전달 계수는 오차가 큰 경우가 많으므로 해석 결과의 물리적 판단에는 주의를 요한다.

등방성의 재료일 때 3차원 비정상 열전도 문제의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \tag{2.1}$$

위의 식을 3차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \tag{2.2}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위 식에서, T : 온도 (°C), c : 비열 (cal/g · °C), ρ : 밀도 (g/cm^3), α : y,z 방향의 열전도율 (cal/cm · sec · °C), t : 시간(sec), $\dot{Q}$: 단위 시간당 입열량이다.

또한, 물체 표면의 열적 경계조건은 Fourier 법칙을 사용하여 다음과 같이 구성된다.

$$q = -\alpha\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\frac{\partial T}{\partial n} \tag{2.3}$$

경계에서 열 전달이 있을 경우에 q는 다음 식과 같이 표현된다.

$$q = \alpha_c(T - T_c) \tag{2.4}$$

위 식에서, q : 열 유속(Heat flux) (cal/sec · cm^2), n : 물체 표면의 외법선 방향 α_c : 열 전달 계수 (cal/cm^2 · sec · °C), T_c : 외부 온도 (°C) 이다.

Galerkin 법을 적용한 고체 열전도 문제를 정식화하기 위해 모델을 유한 개로 분할하고, 한 요소내 발생하는 온도 분포를 아래 식으로 나타내었다.

$$T(y,z,t) = [N(y,z)] \quad \Phi(t) \tag{2.5}$$

위 식에서, T : 요소의 온도, N : 절점 온도와 요소 내 온도를 연결하는 형상함수 Matrix, Φ : 시간 t에 대한 요소의 절점온도 벡터이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식(2.2)에 Galerkin법을 적용시키면 다음과 같이 된다.

$$\int_V [N]^T \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\dot{Q}-\rho c\frac{\partial T}{\partial t}\ dv=0 \tag{2.6}$$

위 식에서, V : 요소의 영역이다.

위 식을 Green-Gauss 정리를 이용하여 전개하면 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}&\int_V \alpha[N]^T \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)\ dv\\ &= -\int_v \alpha\left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z}\right)dv\\ &\quad+\int_s \alpha[N]^T\left(\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial T}{\partial z}\right)ds\end{aligned} \tag{2.7}$$

위 식에서 S : 요소의 경계이다.

식 (2.3), (2.4), (2.5)를 식 (2.7)에 대입하면 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}&-\int_v \alpha\left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\frac{\partial[N]}{\partial x}+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}\frac{\partial[N]}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\frac{\partial[N]}{\partial z}\right)dv\cdot\ \Phi(t)\\ &-\int_s \alpha_c[N]^T[N]ds\ \Phi(t)\ +\int_v \dot{Q}[N]^T dv\\ &+\int_s \alpha_c T_c[N]^T ds-\int_v \rho c[N]^T[N]dv\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial t}=0\end{aligned} \tag{2.8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3차원 비정상 열전도식을 Matrix화 하면 다음과 같이 구해진다.

$$[K]\ \Phi\ +[C]\ \frac{\partial \Phi}{\partial t}\ =\ F \tag{2.9}$$

위 식에서 K : 열전도 Matrix, C : 열용량 Matrix, F : 열 유속 벡터이다.

K, C, F의 내용은 다음 식과 같다

$$[K]=\int_V \alpha\ (\frac{\partial [N]^T}{\partial x}\frac{\partial [N]}{\partial x}+\frac{\partial [N]^T}{\partial y}\frac{\partial [N]}{\partial y}+\frac{\partial [N]^T}{\partial z}\frac{\partial [N]}{\partial z})dv\ \Phi + \int_s \alpha [N]^T[N]ds\ \Phi \tag{2.10}$$

$$[C]\ =\int_V \rho c[N]^T[N]dv \tag{2.11}$$

$$F\ =\int_s \alpha_c T_c[N]^T ds+\int_v \dot{Q}\ [N]^T dv \tag{2.12}$$

식 (2.9)를 풀 경우에 Φ와 $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$의 2개의 미지수가 존재하지만, 시간 증분을 Δt라 하고 증분 전 온도를 Φ^B, 증분 후 온도를 Φ^A 및 그 중간 온도를 Φ^M이라 하면, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi^A}{\partial t}=\frac{\Phi^A-\Phi^M}{(\Delta t/2)},\quad \frac{\partial \Phi^B}{\partial t}=\frac{\Phi^M-\Phi^B}{(\Delta t/2)} \tag{2.13}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (2.13)으로부터 다음과 같은 식을 구성할 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t}(\Phi^A - \Phi^B) - \frac{\partial \Phi^B}{\partial t} \tag{2.14}$$

최종적으로 식 (2.9)를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$([K] + \frac{2}{\Delta t}[C])\ \Phi^A = F + [C](\frac{2}{\Delta t}\ \Phi^B + \frac{\partial \Phi^B}{\partial t}) \tag{2.15}$$

위 식에서, Δ_t : 시간 증분, Φ^A : 증분 후 절점 온도, Φ^B : 증분 전 절점 온도 K : 열전도 Matrix, C : 열용량 Matrix, F : 열 유속 벡터이다.

식(2.15)에서, 시간 t에 대한 Φ^B의 값을 알면 이 연립 방정식의 해인 Φ^A를 구할 수 있다. 초기조건으로서 $\Phi^B_{t=0}$을 대입하면 된다. [17]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.2 레이저 용접 열원 모델

본 연구에서는 레이저 용접 진행시 시험편에 미치는 열원의 영향 및 그 영역을 파악하기 위해 용접부에 대한 시뮬레이션을 수행하여 열적 특성을 규명하고자 하였다.

가우시안 빔에 대한 Finite Difference 기법을 구현하였으며, 레이저 열에 의한 시험편의 표면 비등점 이하 입사 복사광의 흡수율은 20%이지만, 레이저 복사선의 흡수율은 온도가 비등점을 초과하면 100%가 된다. Beer-Lambert law에 따라 $q_z = q_0{}^{-\beta z}$, β : 흡수계수, q_z와 q_0는 깊이 z에서와 표면에서의 intensity이다. 이 식을 통해 키홀 용접 시작부의 물리적 현상을 시뮬레이션 할 수 있다.

한 논문에서는 용접부의 열 흐름을 증명하기 위해 가우시안 열 유동 방정식을 이용한 2차원 Finite difference을 적용하였다. 가우시안 열 유동 $Q(r)$은 다음과 같은 식으로 나타내었다.[18]

$$Q(r) = \frac{3P}{\pi \bar{r}_1^2} exp\left(-d\frac{r^2}{\bar{r}_1^2}\right) \tag{2.16}$$

$\bar{r}_1$ 은 최대 intensity에서 약 5%정도 감소한 유효 반지름이다.

위 논문의 모델은 열 유속 방정식을 적용하였고, 깊은 용입 용접의 경우에는 내부 발열에 사용 되었다. 본 모델에 적용 된 열원 방정식은 다음과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$Q(r,z) = \frac{2\beta P}{\pi \bar{r}_2^2} exp\left(-d\frac{r^2}{\bar{r}_2^2} - \beta z\right) \tag{2.17}$$

여기서 $\bar{r}_2$는 최대 intensity에서 13.5% 감소한 유효 반지름이다.

본 방정식을 바탕으로 레이저 용접 입열과 내부 열원의 분포를 다음과 같은 방정식을 이용하여 확인하였다.

$$Q(r,z) = \frac{9P}{\pi \bar{r}_3^2 \bar{z}} exp\left[-d\left(\frac{r^2}{\bar{r}_3^2} + \frac{z^2}{\bar{z}^2}\right)\right] \tag{2.18}$$

본 연구에서 수치해석에 적용된 공식은 식 2.3을 적용하였으며, 열원은 레이저 빔 형상에 따라 가우시안 분포를 가지며, 시험편 두께 방향으로 지수 함수 적으로 감소한다고 가정하였다. 여기서 d는 초점길이, $\bar{r}_3$는 레이저 빔의 반경, $\bar{z}$는 두께 방향 깊이로 defocusing 15mm를 적용하였다. [19]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.2 열탄소성 이론의 유한요소 정식화

(1) 용접 잔류응력 특성

잔류응력은 재료가 압축력 또는 인장력을 받을 때 발생하는 응력이다. 용접 시 발생하는 열에 의해 재료는 팽창과 수축 현상을 반복하게 된다. 융착 금속이 냉각될 때 재료의 체적은 수축하려 하지만 모재로 인해 제한을 받기 때문에 그 거동이 자유롭지 못한다. 이 때 발생하는 응력을 용접 잔류응력이라 하고 일반적으로는 용접 응력이라고 한다. 용접 시 발생하는 이 응력은 재료의 항복 응력에 가까운 값을 가지기도 한다. 구조물의 진동, 부식, 취성, 피로 등에 가장 주요한 요인이 되는 것이 바로 용접 잔류응력으로, 비 구속 용접에 의해 발생하는 잔류응력과 용접시 외부 구속에 의한 잔류응력으로 구분되며 외부로부터 받는 힘, 외력에 의해 변하는 경우도 있다.

현재 잔류응력을 평가하는 방법은 크게 두가지로 나뉘는데, 실험적 방법과 수치해석 적 방법이 그에 해당한다. 실험적 방법은 시간과 경제적으로 제약된다는 단점이 있다. 하지만, 수치해석 기법의 발달에 따라 용접으로 인해 발생하는 잔류응력의 영향을 수치로 정립하는 노력이 활발하게 진행되고 있다. IIW(International Institute of welding), EPRI(Energy Power Research Institute) 등에서도 용접 현상을 정량화 하려는 연구를 수행한 바 있다. [20,21]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2) 3차원 열탄소성 유한요소정식

시험 제원이 폭 두께 대비 길이가 충분히 길다면 길이 방향에 대한 평면의 열적, 역학적 거동은 길이 방향에 따라 일정하다고 가정할 수 있다. 용접 시단부 와 종단부를 제외하고 온도 상승과 냉각 과정이 일정한 준 정상역이 되고 두가지 조건으로 가정 할 수 있다. 첫 번째, 응력과 변형률 분포는 용접 길이 방향에 대해 독립니다. 두 번째, 용접 길이 방향에 수직 평면이 변형 전의 평면으로 존재한다면, 변형 후에도 평면으로 존재한다.

이 두가지 가정을 정식화 하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y},\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2.19}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y},\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \tag{2.20}$$

하지만 전단 변형률측면에서 열은 등방성이기 때문에 그에 의한 변형은 발생하지 않는다는ㄱ 서을 고려하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \tag{2.21}$$

구조물이 경계조건과 물체힘을 만족하면서 평형을 이루고 있다면, 평형 방정식과 역학적 경계조건이 성립되고, 가상일의 원리(Principle of virtual work)를 정식화 할 수 있다.

$$\int_V \delta\{\varepsilon\}^T\{\sigma\}dV - \int_V \delta\{U\}^T\{\overline{F}\}dV - \int_{S^\sigma} \delta\{U\}^T\{\overline{T}\}dS = 0 \tag{2.22}$$

위 식에서 σ : 응력벡터, ϵ : 변형률 벡터, U : 단위체적 당 표면력 벡터이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서 열 응력 문제의 변형률 - 변위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x},\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y},\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2.23}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0,\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0,\ \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{2.24}$$

응력 변형률 관계식은 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} = 0 \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha T & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz} = 0 \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx} = 0 \end{aligned} \tag{2.25}$$

위 식에서 $\{a\}T = \epsilon^t$: 열 변형률, a : 순간 선팽창계수, T : 온도 이다.

따라서 전 변형률 ϵ은 탄성 변형률 ϵ^e와 열 변형률 ϵ^t의 합으로 아래 식으로 나타낼 수 있으며,

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^e\} + \{\varepsilon^t\} \tag{2.26}$$

응력과 변형률을 나타내는 관계식은 후크의 법칙 (Hooke's law)으로부터 나타나며 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [D^e]\{\varepsilon^e\}$$

$\{\sigma\} = [D^e](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^t\})$, $[D^{e]}$: 탄성 응력-변형률 메트릭스 이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(3) 응력 - 변형률 관계

재료의 물리적 성질의 온도 의존성을 고려하여 응력증분의 영향을 $[C]dT$라고 한다면, 응력 - 변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - [C]dT \tag{2.27}$$

재료가 탄성 거동을 하는 경우에는 다음과 같이 식으로 표현할 수 있다.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^t\}$$
$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon^e\} \tag{2.28}$$

위에서 ϵ^e : 탄성 변형률, σ : 응력, T : 온도의 함수이며, 탄성 변형률의 증분은 아래와 같이 나타나며,

$$\{d\varepsilon^e\} = \left\{\frac{\partial\varepsilon^e}{\partial\sigma}\right\}\{d\sigma\} + \frac{\partial\{\varepsilon^e\}}{\partial T}dT$$
$$\{d\varepsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT \tag{2.29}$$

전 변형률 증분은 다음과 같이 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{d\varepsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\}dT + \{\alpha\}dT \tag{2.30}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위 식을 정리하면, 탄성역에서의 응력증분에 대한 방정식을 구할 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e](\frac{\partial[D^e]^{-1}}{\partial T}\{\sigma\} + \{\alpha\})dT$$

$$= [D^e]\{d\varepsilon\} - ([D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E}\frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\})dT$$

$$= [D^e]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \qquad (2.31)$$

위 식에서, E_1은 온도 변화 $\triangle T$후의 탄성계수

$\{C\}: [D^e]\alpha\frac{1}{E} - \frac{E-E_1}{\Delta T}\{\sigma\}$ 이다.

재료가 소성 거동을 할 때에는 재료의 항복응력 σ_Y는 온도 T와 소성 일 (Plastic work) $W^P(\overline{\sigma}, \epsilon^P)$의 함수로서 $\sigma_Y(T, W^P)$로 하고, 항복함수 F는 응력 σ와 항복응력 σ_Y로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\overline{\varepsilon}^p, T)$$

$$= \overline{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\overline{\varepsilon}^p, T) \qquad (2.32)$$

즉, $dF = df - df_0 = 0$을 만족할 때 재료는 항복된다. 따라서 재료가 소성역에서 부하상태에 있을 때에는 $dF = 0$의 조건을 만족해야 한다.

$$dF = \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T\{d\sigma\} - \left\{\frac{\partial f_0}{\partial \overline{\varepsilon}^p}\right\}^T\{d\overline{\varepsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T}dT = 0 \qquad (2.33)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

위에서 $\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$: 상당응력의 변화, $\left\{\frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^P}\right\}$: 가공경화, $\frac{\partial f_0}{\partial T}$: 온도증분이다.

소성 역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내고, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하면, 소성 변형률은 다음과 같은 식이 된다.

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \tag{2.34}$$

위 식에서 $\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}$: 편차응력, λ : 양(+)의 스칼라양이며 위 식은 Von-Mises 항복 조건을 따른다.

전 변형률(Total strain) $\{d\epsilon\}$은 아래와 같이 탄 소성 및 열 변형률의 합으로 나타낼 수 있으며,

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^t\} \tag{2.35}$$

아래와 같은 소성역에서의 응력 증분에 대한 구성 방정식이 구해진다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\varepsilon\} - [D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\lambda - [D^e]\{\alpha\}dT$$

$$+ \frac{d[D^e]}{dT}[D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \tag{2.36}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 CFRP/Steel Laser 용접부 특성 평가

3.1 용접 공정 변수 별 용접 특성

3.1.1 CFRP/SGAFC 590DP의 용접 특성

먼저 레이저 출력을 결정하기 위해 BOP 용접을 진행하였다. 레이저 출력 400, 600, 800W 용접 속도 : 10mm/s로 진행하여 Macro 단면 분석을 통해 출력을 600W로 결정하였고, 그 후 용접 속도를 선정하기 위한 실험을 진행하였다.

Table. 3.1은 용접 속도를 설정하기 위해 레이저 출력 : 600W 용접 속도 6 ~ 18mm/s로 기초 실험을 진행한 후 Macro 단면을 분석한 것으로 그 결과 6mm/s를 제외한 모든 조건에서 steel간의 접합이 이루어지지 않았다. Steel간의 용접이 이루어짐과 단면 사진을 통해 용접 속도 6mm/s의 조건은 입열이 과하다고 판단되었으나, Steel과 CFRP의 열전도 특성을 고려했을 때, CFRP는 열전도율이 낮기 때문에 이종재 용접 시 열 확산이 훨씬 떨어질 것이라 판단하여 3 - 7mm/s 로 실험을 진행하였다.

Table. 3.2은 레이저 출력 600W, 용접 속도 3-7mm/s의 비드 형상과 용접계면을 보여주는 사진이다. 본 실험은 용접 속도 7mm/s부터 진행을 하였으며, 용접 진행 시 발생하는 스패터와 비드 표면의 pit와 같은 가시적인 결함이 발생하지 않으면 입열량을 높여 CFRP의 용융 용융 면적을 최대한 확보하고자 속도를 낮추면서 진행하였다. 그 결과 4mm/s까지도 비교적 미려한 비드 형상을 보였으나, 3mm/s의 조건에서 소량의 spatter와 pit가 발생하여 3mm/s에서 실험을 마쳤다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

실험 후 용접부 단면 시험편을 채취하여 단면 특성 분석을 통한 접합 여부 및 접합면 특성을 파악하려 하였으나 속도 4-7mm/s의 조건에서는 단면 시험편 채취 과정에서 파단 되었다. 3mm/s의 경우 pit와 스패터로 인해 파단될 거라는 예상과는 달리 절단 후에도 접합되어 있던 것으로 확인 되었으며, 본 조건에서 조도의 유무와 Defocusing의 차이에 따른 강도 특성을 비교하기 위해 표면 조도를 부여하고, Defocusing 0mm, 5mm, 10mm의 조건에서 전단 인장 시험을 실행하였다.

Table. 3.1 Cross section of laser welding for SGAFC fabricated in P : 600W, V : 6~18mm/s

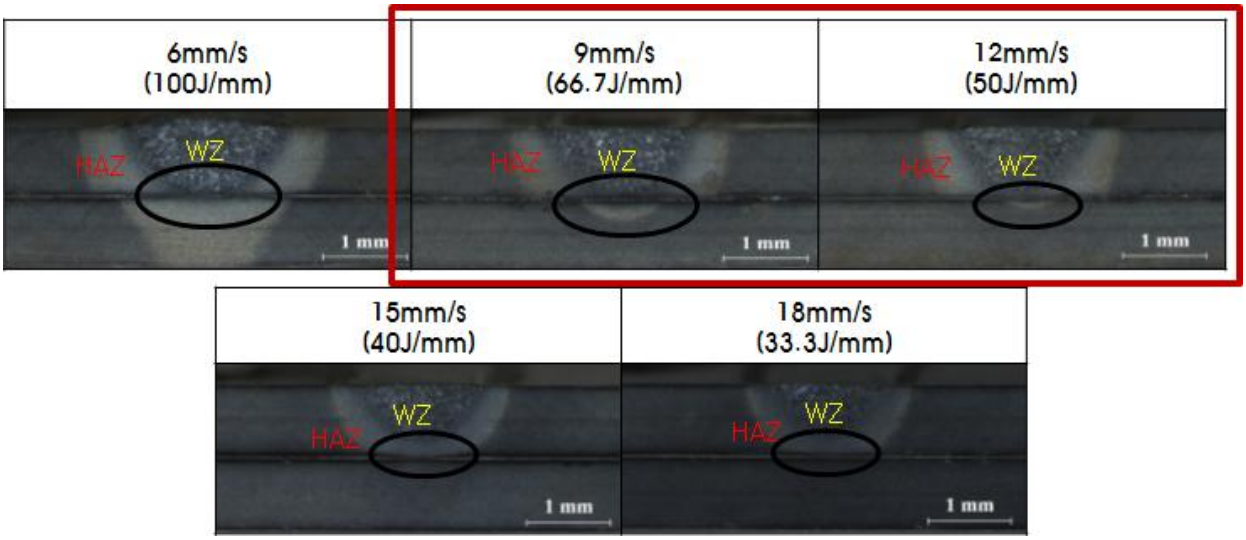
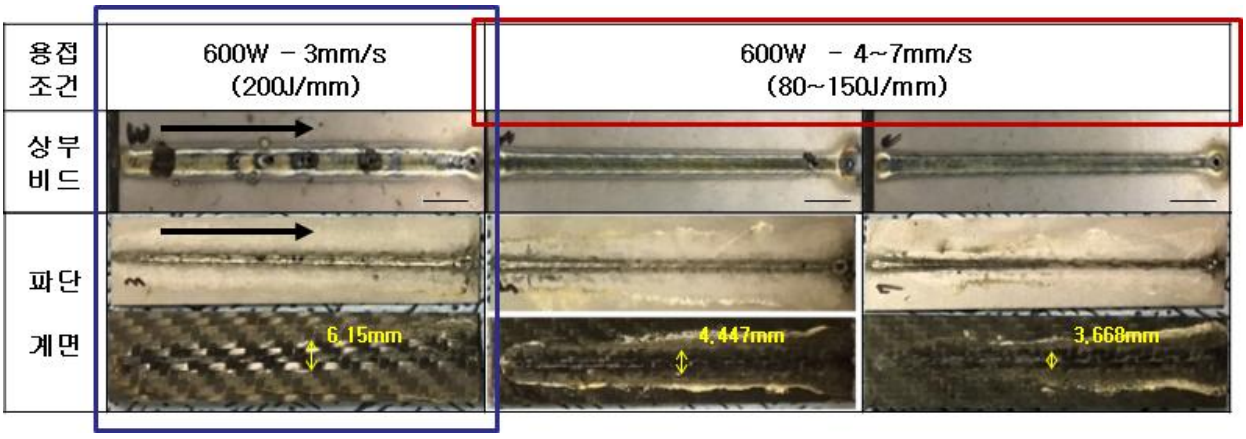


Table. 3.2 Fractured interface of laser welding for CFRP/SGAFC fabricated in P : 600W, V : 3~7mm/s



Collection @ chosun

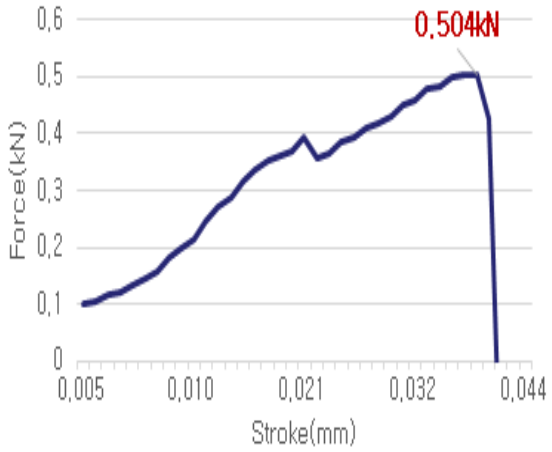
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

앞서 진행된 용접 조건을 선정하기 위한 실험 중 양호한 입열량으로 인해 접합이 이루어진 레이저 출력 : 600W, 용접 속도 : 3mm/s의 조건에서 초점위치(Defocusing)의 변화, 표면 거칠기(Surface roghness)의 유무에 따른 인장 강도 특성을 비교하였다. Defocusing은 0, 5, 10mm에서 진행하였고, 각 조건별로 표면 조도의 유무에 따라 실험을 진행하였다. Defocusing : 0mm 조건은 전단 인장 강도 시험 전 모두 파단되어 강도를 확보할 수 없었으나, 5, 10mm에서는 강도를 확보할 수 있었다. 강도 확보가 가능했던 조건에서 표면 조도 유무에 따른 특성을 고찰하기 위해 Amery paper를 이용해 1.5㎛ ~ 2㎛로 부여하고 조도 측정기로 측정하였다.

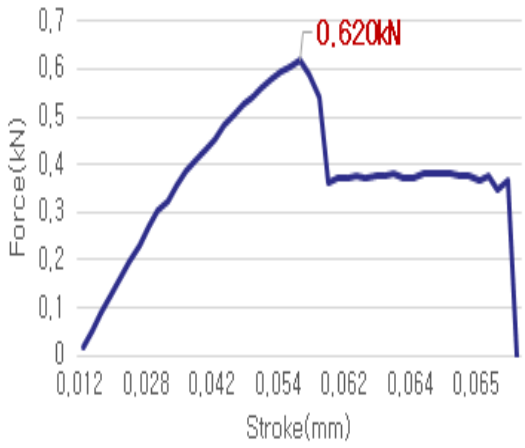
Flg. 3.1은 초점위치 +5, +10mm 주어진 조건에서 조도의 유무에 따른 전단 - 인장 강도 시험 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 표면 조도가 주어지지 않았을 때, Defocusing +5, +10mm에서 각 각 0.504kN, 0.500kN으로 확인 되었고, 조도가 주어진 조건에서는 약 0.620kN, 0.648kN으로 0.11 ~ 0.15kN의 차이를 보여 25%정도 강도가 향상된 것을 확인하였다.

Collection @ chosun

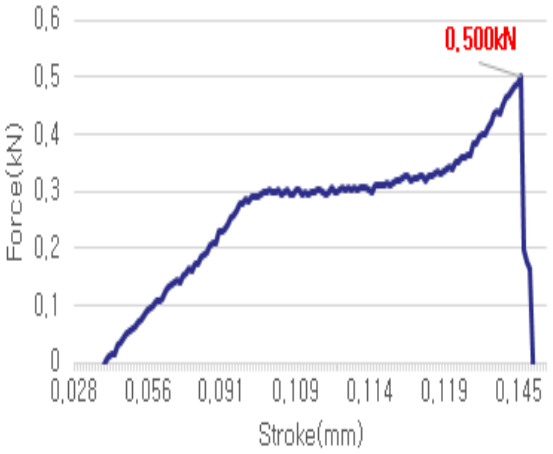
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



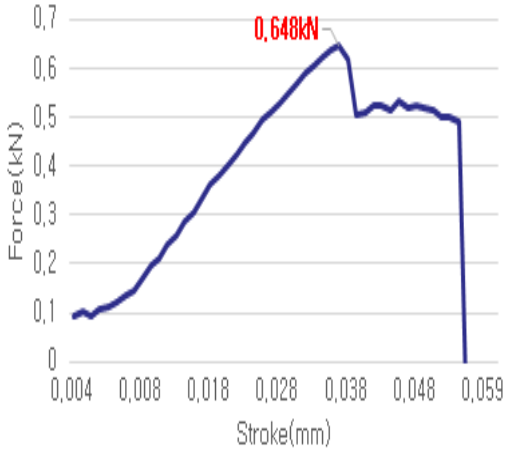
(a) Roughness : 0
Defocusing : 5mm



(b) Roughness : 1.5㎛ ~ 2㎛
Defocusing : 5mm



(c) Roughness : 0
Defocusing : 10mm



(d) Roughness : 1.5㎛ ~ 2㎛
Defocusing : 10mm

Fig. 3.1 Tensile shear strength of CFRP/SGAFC depand on surface roughness fabricated in P : 600W, V : 3mm/s, Defocusing : 5, 10mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전단 - 인장 시험 결과 최대 인장 강도는 Defocusing : 10mm조건에서 표면 조도를 부여했을 때, 약 0.648kN의 강도를 확보하였다. Defocusing의 차이에 따라 0mm일 때는 강도를 확보할 수 없었던 반면, 5mm, 10mm의 조건에서는 강도를 확보 할 수 있었다. 이는 초점 위치에 따라 열 밀도(단위 면적당 입열량)가 감소하여, 더 넓은 영역이 영향을 받아 CFRP 용접부의 용융 면적이 넓어져 그 만큼 접합되는 영역이 넓어졌으며, CFRP와 Steel간의 가장 중요한 요소 중 하나인 bubble의 사이즈가 작아짐에 따라 강도를 확보할 수 있었던 것으로 예측했다. [22]

전단 인장 강도 시험의 결과를 보았을 때, defocusing 5mm에서 표면 거칠기 유무에 따라 조도가 주어진 조건에서 강도가 0.12kN, 10mm에서 0.15kN 정도 최대 인장 강도가 증가하였음을 확인하였다. 이는 표면 거칠기로 인해 아연도금강판의 아연 층을 제거함으로써 아연 폭발로 인한 Pit와 스패터 발생을 줄이고, 조도로 인해 CFRP의 레진이 보다 더 효율적으로 steel에 융착 됐음을 예측할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.2 CFRP/SPFC 590DP의 용접 특성

CFRP와 냉간압연강판 간의 실험을 진행하기에 앞서 아연도금강판으로 진행했던 실험과 동일한 방법으로 레이저 출력과 용접속도를 선정하기 위해 BOP (Bead on Plate)실험과 동 종재 Steel간의 실험을 먼저 진행하였다. 아연도금강판보다 0.6mm더 두꺼운 시험편이었기 때문에 레이저 출력을 400, 600, 800W에서 600, 800, 1000W로 높이고 용접 속도는 동일하게10mm/s의 조건에서 레이저 출력을 선정하기 위한 실험을 진행하였으며 단면 분석을 통해 1000W로 레이저 출력을 선정하였다.

Table. 3.3은 레이저 출력 : 1000W, 용접 속도 : 5, 6, 7mm/s, Defocusing :0mm의 조건에서 진행한 시험편의 단면 사진이다. 앞서 진행한 실험의 단면 분석을 통해 입열이 부족하다고 판단되어 입열량을 키우기 위해 용접 속도를 10mm/s에서 5~7mm/s로 낮추어서 실험을 진행한 후 단면 특성을 고찰하였다.

Table. 3.4는 동일한 조건에서 동종재와 이종재로 실험을 진행한 후 비드 형상을 나타낸 사진이다. 동종재의 경우 모든 실험조건에서 미려한 비드 형상을 보였으나, 이 종재로 진행한 실험의 비드 형상을 보면 다량의 Pit가 발생한 것으로 보인다. 동종재와 달리 이 종재에서 이러한 결함이 발생한 이유는 CFRP와 Steel의 열 확산 속도와 용융점이 크게 다르기 때문에 용접부에 가해지는 국부적인 열이 Steel과는 달리 CFRP에서 확산 되지 못하여 열에 의해 연화된 Steel을 통해 레진이 폭발하면서 이러한 결함을 유발한 것으로 판단된다.

위 실험을 토대로 CFRP/SPFC간 용접 조건을 설정하였으며, 레이저 출력 (P) : 1000W, 용접 속도 : 5 - 8mm/s로 설정하고 Defocusing을 적용하기로 했다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3.3 Cross section of laser welding for SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5, 6, 7mm/s

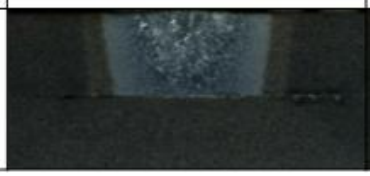
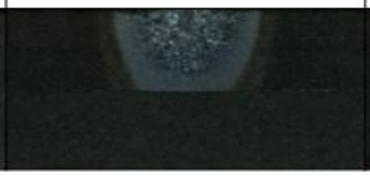
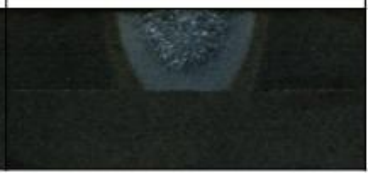
용접속도	5mm/s (200J/mm)	6mm/s (166.7J/mm)	7mm/s (142.9J/mm)
용접부			

Table. 3.4 Bead Characteristics of laser welding for SPFC and CFRP/SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5, 6, 7mm/s

용접 조건 / 소재	5mm/s (200J/mm)	6mm/s (166.7J/mm)	7mm/s (142.9J/mm)
동종재 Steel			
이종재 CFRP-Steel			

CFRP/SPFC간 속도와 Defocusing에 따른 강도 특성을 분석하기 위해 레이저 출력 P : 1000W로 고정하고 용접 속도 V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 0, +5, +10, +15mm로 변경하여 초점 위치에 따른 특성을 분석하였다. 그 결과 Defocusing : 0mm일 때는 전단 인장 시험 시작과 동시에 파단 되었으며, +5mm일 때는 용접 속도 5mm/s의 조건에서 0.57kN, 6mm/s - 0.51kN, 7mm/s - 0.45kN을 확보하였으며 8mm/s의 조건에서는 강도 값을 확보할 수 없었다. 5,6의 조건에서는 강도를 확보하였으나 결함이 발생하여 7mm/s의 조건에서 Defocusing에 따른 강도 특성을 비교하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3.2은 P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 0 - 15mm의 조건으로 Defocusing에 따른 강도 특성을 비교한 것이다. 시험 결과 Defocusing 0mm에서는 강도를 확보할 수 없었으며, 5mm - 0.455kN, 10mm - 0.854kN, 15mm - 1.215kN의 강도를 각 각 확보하였다.

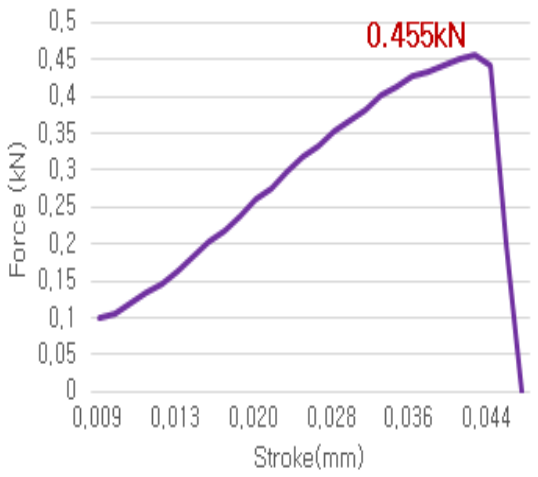
Fig. 3.3은 P : 1000W, Defocusing : 15mm, V : 5 - 8mm/s의 조건으로 용접 속도에 따른 강도 특성을 비교한 것이다. 시험 결과 속도 5mm/s에서 1.518kN으로 가장 높은 강도 값을 확보하였으며, 6mm/s - 0.842kN, 7mm/s - 1.215kN, 8mm/s - 0.552kN의 강도를 확인하였다.

Table. 3.5는 Defocusing +15mm에서 속도에 따른 비드 형상 및 파단 계면 사진을 찍은 것이다. 비드 형상을 보았을 때, 5와 6mm/s 에서는 비드 표면에 다량의 Pit가 발생한 것으로 보이며 7, 8mm/s에서는 미려한 비드 형상을 보였다.

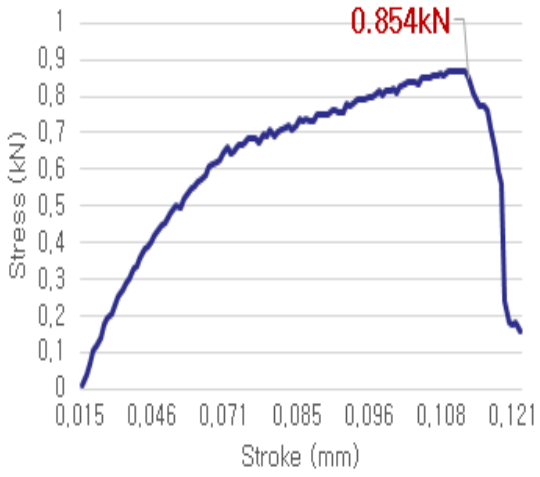
시험 결과, Defocusing 15mm에서 가장 양호한 강도를 확보하였으며, 속도에 따라 5mm/s에서 가장 높은 강도 값을 확보 하였으나 다량의 용접 결함으로 인해 적절한 용접조건이 아님을 확인하였고, 6mm/s 역시 결함으로 인해 융착 면적이 줄어들어 7mm/s 보다 낮은 강도 값이 나타난 것으로 판단되었다. 하부 비드의 사진을 봤을 때, 5, 6mm/s에서는 과다한 입열량으로 인해 CFRP 끝 단부가 녹은 것을 볼 수 있고, 7mm/s는 CFRP 레진이 용융 되어 흘러나온 것으로 보아 적절한 입열량으로 가장 좋은 조건인 것으로 확인 되었다. 8mm/s는 부족한 입열량으로 인해 접착 면적이 부족하여 강도가 떨어진 것으로 판단된다. 조건 별 입열량 및 용융 부 너비를 파단 계면의 열 영향부 너비를 측정함으로써 비교하였으며, 속도가 감소함에 따라 열 영향부의 너비 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

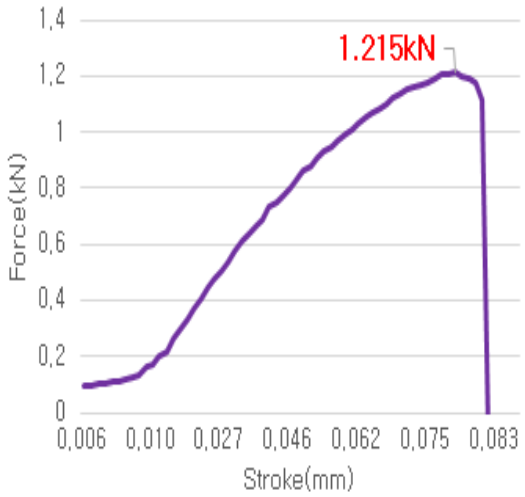
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Defocusing : 5mm



(b) Defocusing : 10mm

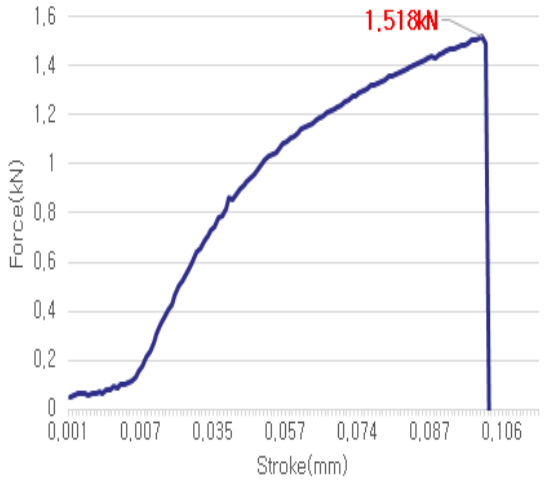


(c) Defocusing : 15mm

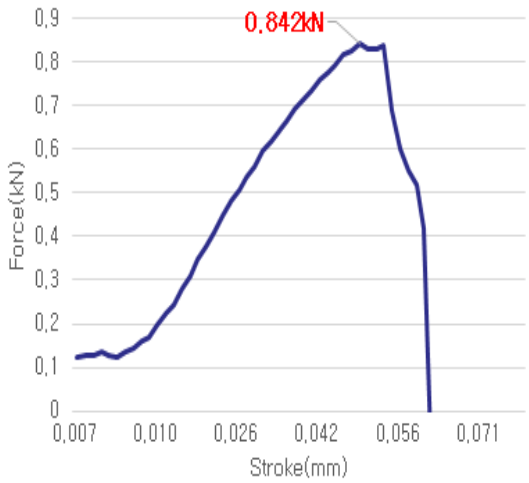
Fig. 3.2 Tensile strength of CFRP/SPFC depand on defocusing fabricated in P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 5 - 15mm

Collection @ chosun

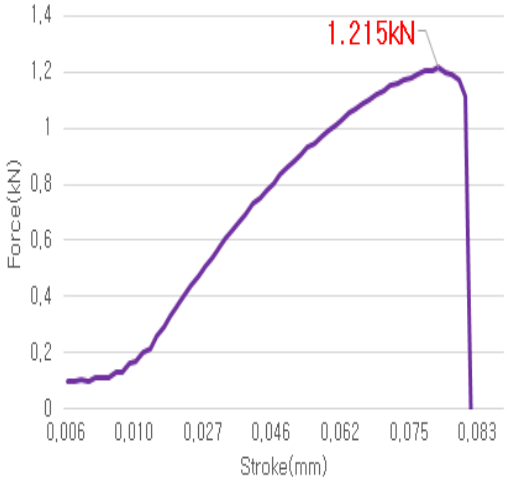
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



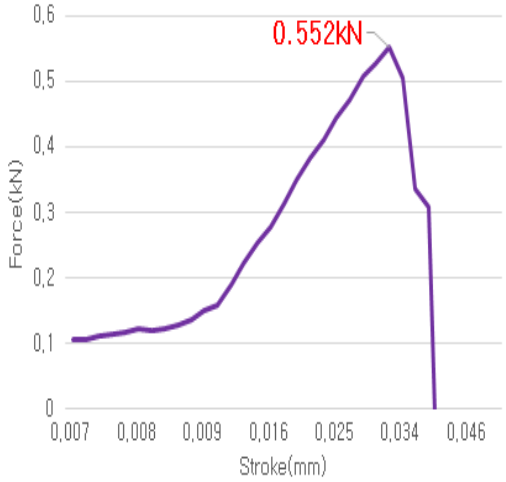
(a) V : 5mm/s



(b) V : 6mm/s



(c) V : 7mm/s



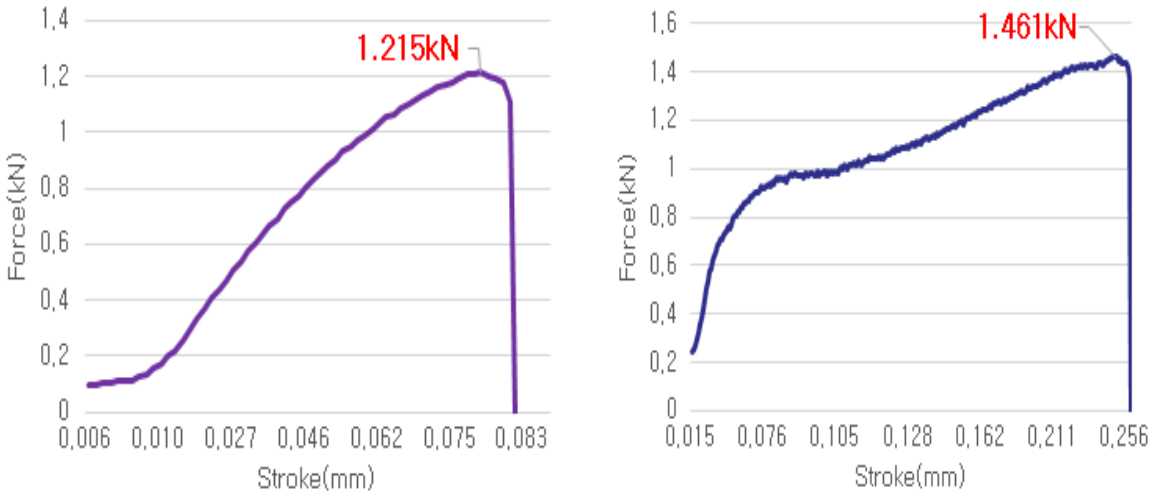
(d) V : 8mm/s

Fig. 3.3 Tensile strength of CFRP/SPFC depand on welding speed fabricated in P : 1000W, V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 15mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3.4는 CFRP/SPFC 용접 시, 표면 조도에 따른 전단 - 인장 강도의 차이를 나타낸 것이다. 표면 조도에 따른 전단 - 인장 강도 특성을 확인하기 위해 위에서 얻어진 실험 조건 중 접합이 양호하게 이루어지고, 비드 형상이 미려했던 용접 속도 : 7mm/s를 선정하였다. 표면 조도는 SPFC 시험편 표면에 1.5 ~ 2.0㎛의 거칠기를 부여하여 실험을 진행하였으며, 전단 - 인장 시험 결과 조도 유무에 따라 조도가 주어진 조건이 없는 조건보다 0.246kN 약 20% 정도 강도가 상승한 것을 확인할 수 있었다.



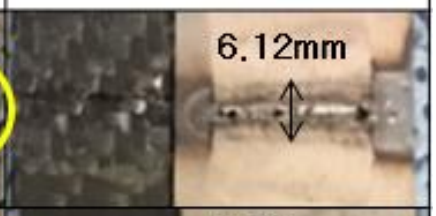
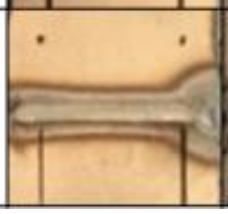
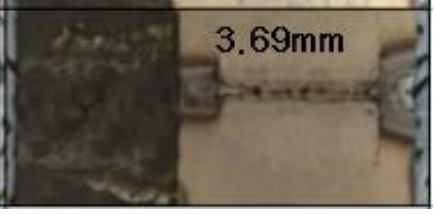
(b) Roughness : 0 (a) Roughness : 1.5 - 2.0㎛

Flg. 3.4 Tensile strength of CFRP/SPFC depand on surface roughness fabricated in P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 15mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3.5 Bead and Weld Interface Characteristics of CFRP/SPFC fabricated in P : 1000W, V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 15mm

용접 속도	상부 비드	하부 비드	파단 계면
5mm/s (1.51kN)			
6mm/s (0.84kN)			
7mm/s (1.21kN)			
8mm/s (0.55kN)			

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.1.3 표면 조도 유무에 따른 용접 특성

앞서 진행했던 실험에서 Defocusing과 속도 별로 단면을 분석하고자 하였다. 레이저 출력 P : 1000W, 용접 속도 V : 5 - 8mm/s, Defocusing : 0, 5, 10, 15mm 의 조건에서 단면 시험편을 채취하고자 하였으나, 용접 속도 7mm/s, Defocusing : 15mm의 조건 이외에 다른 조건은 시험편 채취 과정에서 모두 파단 되었다.

Table. 3.6은 위 실험 조건 중 가장 접합이 잘 이루어 졌던 조건인 레이저 출력 P : 1000W, 용접 속도 V : 15mm/s, Defocusing : 15mm에서 표면 조도 유무에 따른 단면 형상을 비교한 것이다. Macro - X 20배율의 과정을 통해 용접부 관찰 부위를 표현하였고, X 50배율 사진을 분석한 결과 조도의 차이에 따라 접합 계면의 CFRP와 Steel간 열에 의한 유동 차이를 확인할 수 있다.

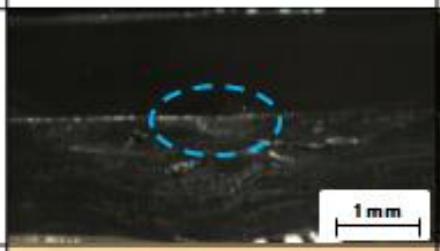
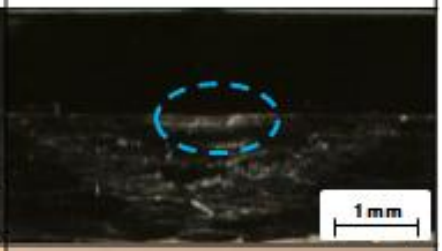
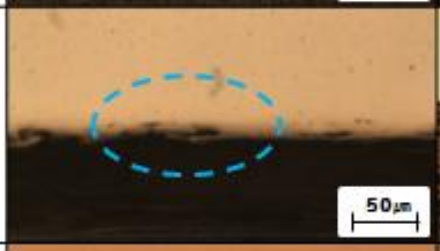
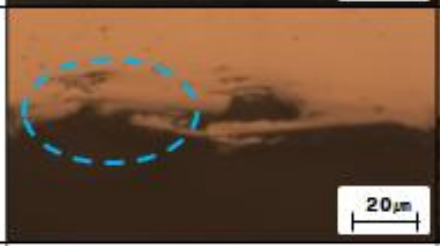
Table. 3.6의 단면 사진을 보면, 두 조건 모두 동일한 용접 조건에서 진행했기에 Defocusing +15mm의 효과로써 CFRP측에 열이 넓게 분포한 것을 확인할 수 있다. Laser 용접 진행시 열전도 용접을 이행하는 이유를 본 사진을 통해 확인할 수 있으며, 이러한 방법으로 진행하지 않고 Defocusing 0mm에서 실험을 진행했다면 국부적인 열로 인해 CFRP의 용접 비드 표면에 다량의 Pit와 CFRP/Steel용접시 가장 문제시 되고 있는 내부 기공이 더 많은 양 발생 할 것이라고 예상하였다. [23]

조도가 주어진 조건에서는 표면 조도 틈새를 따라 CFRP가 채워진 것을 볼 수 있고, 조도가 주어지지 않은 시험편은 반대로 매끈한 계면 형상을 볼 수 있다. 조도가 주어진 조건은 CFRP가 용융되어 Steel의 조도 부분에 침투하면서 interlock 된 것들 확인할 수 있었다. 미세하지만 용접부 전반적으로 이러한 현상이 발생하여 강도가 상승하는 효과를 보인 것을 광학 현미경을 통해 micro 분석으로 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3.6 Cross section of specimens in accordance with surface roughness

P : 1000W V : 7mm/s Defocusing : 15mm	Roughness: 3㎛	Roughness: 0㎛
Macro		
X5		
X10		
X20		
X50		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

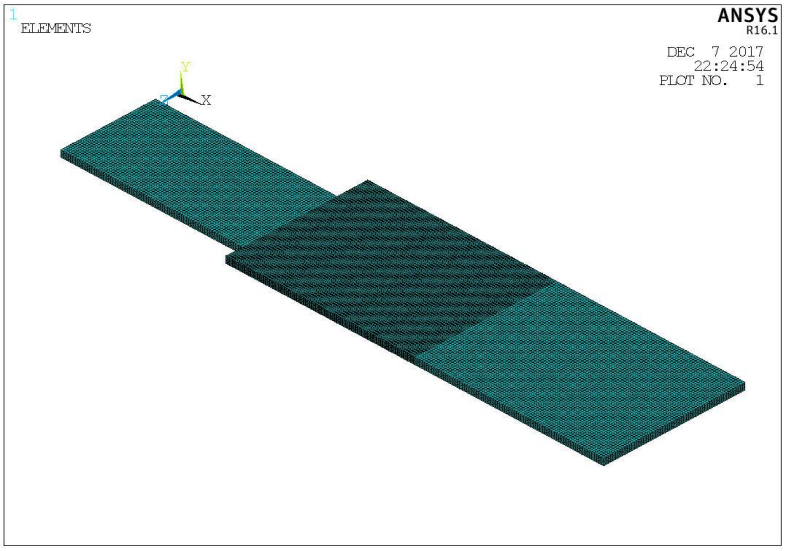
제 4 장 CFRP/Steel Laser 용접부의 온도 및 잔류응력 수치해석

4.1 수치해석 모델 및 조건

CFRP/Steel 용접 시 발생하는 열 분포 및 잔류응력 특성을 분석하기 위해 Ansys Classic 프로그램을 이용하여 3차원 열전도 및 열탄소성 수치해석을 수행하였다.

수치해석을 위해 사용된 모델은 CFRP와 SPFC 시험편의 크기와 동일하게 CFRP = 80 X 20 X1.5mm(L X W X T), Steel = 80 X 30 X 1.5(L X W X T) 선정하였다.

Fig. 4.1에 수치해석 모델을 나타내었다. 해석 모델의 요소(element) 사이즈는 용접부 25 X 25 X 25mm (L X W X T), 모재부 50 X 25 X 25mm (L X W X T)이며, 요소의 개수는 144,000개, 절점 개수는 165,472개로 분할하여 용접부에 대한 온도 및 잔류응력의 분포 특성을 고찰하였다.



Flg. 4.1 FE analysis model

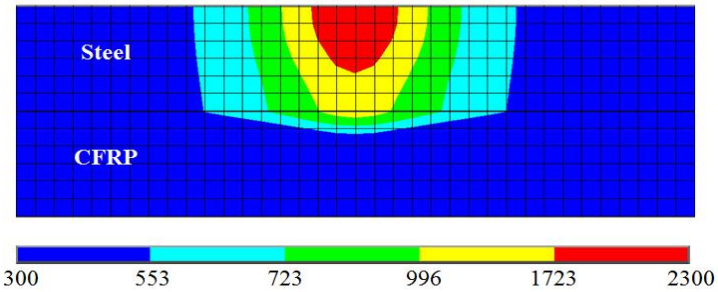
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

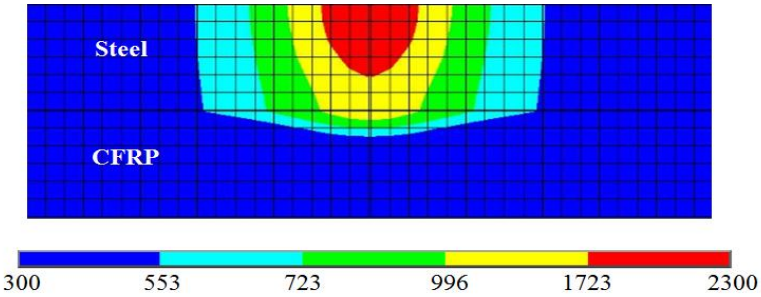
4.2 온도 분포 특성

CFRP/Steel laser 용접부의 온도 분포 특성을 고찰하기 위해 3차원 비정상 열전도 해석을 실시하였다. 해석 조건은 레이저 출력 : 1000W, 용접속도 : 5 - 8mm/s, Defocusing : 0mm의 조건으로, 이 때 초기 온도는 20°C를 적용하였다.

Fig. 4.2(a)~(d)는 상기 용접 조건에서 Steel과 CFRP의 레이저 용접시 시험편 중간 지점 15mm 지점에서의 용접부에 대한 온도 분포를 나타낸 것이다.



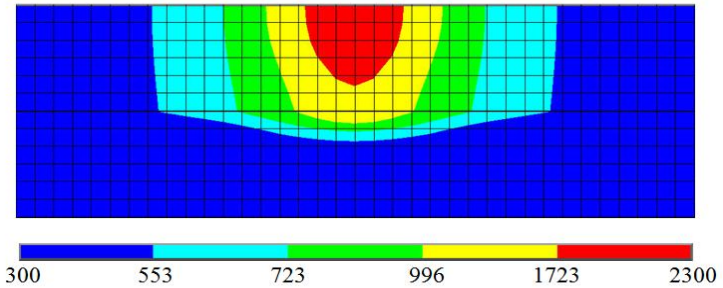
(a) Temperature distribution with P : 1000W, V : 8mm/s, Defocusing : 0mm



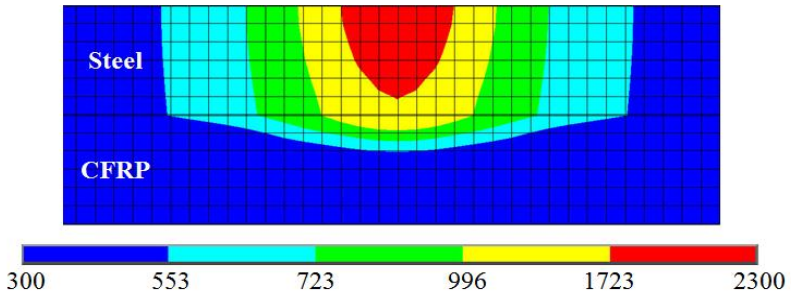
(b) Temperature distribution with P : 1000W, V : 7mm/s, Defocusing : 0mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(c) Temperature distribution with P : 1000W, V : 6mm/s, Defocusing : 0mm



(d) Temperature distribution with P : 1000W, V : 5mm/s, Defocusing : 0mm

Fig. 4.2 Temperature distribution depand on welding speed

Fig. 4.2의 온도 단위는 절대온도[K]이며, 상온 300K ~ 2300K까지의 분포를 나타내었으며, CFRP의 용융점 : 553K, Steel의 공석 변태점 : 996K, Steel의 융점 : 1723K이다.

Fig 4.2의 결과를 보면, 용접 속도가 감소함에 따라 입열이 증가하여, 용입 깊이, HAZ의 영역이 증가하였다. 하지만 아래에 위치한 시험편의 용접부 폭(용융, HAZ)은 커졌으나 용입 깊이의 변화는 CFRP의 열전도도가 Steel에 비해 낮기 때문에 크게 나타나지 않음을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다.

Collection @ chosun

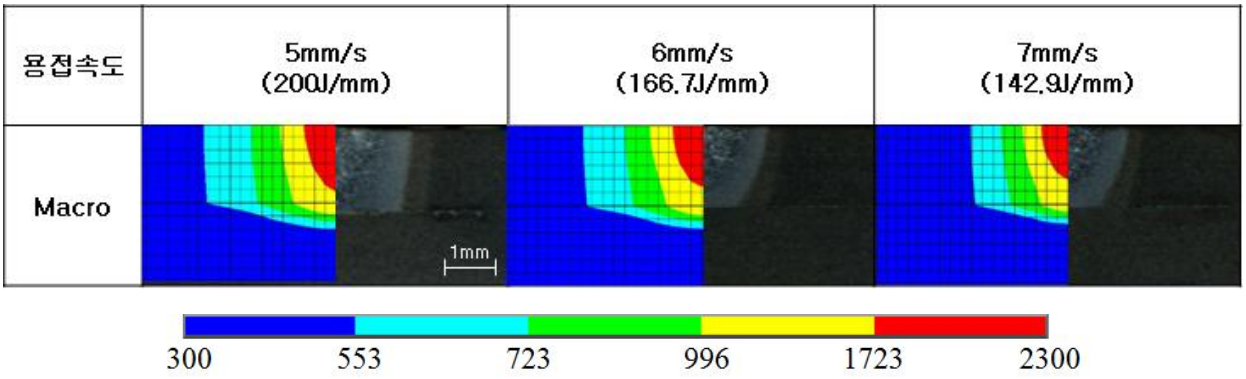
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수치해석을 통해 5mm/s의 경우 입열량 증가로 인해 용접부 크기가 커져, CFRP의 접합면에 가해지는 입열 면적이 넓고, 8mm/s의 경우 CFRP를 용융 시켜 접합하기에는 입열 면적이 다소 부족할 것이라 판단하였다.

각 조건 별 용접 진행 시 속도에 따른 시험편 용접면 온도의 변화를 수치해석 시뮬레이션을 통해 확인한 결과, 속도 5mm/s 의 경우 1577.5K, 6mm/s : 1444.58K, 7mm/s : 1305.19K, 8mm/s : 1128K로 확인 되었다.

Fig. 4.2에 나타난 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 실제 실험과 비교해본 결과 실험과 수치해석을 통한 온도 분포가 정량적, 정성적으로 일치하여 수치해석의 결과가 타당함을 Table. 4.3을 통해 입증하였다.

Table. 4.1 Comparison of temperature distribution between cross section of laser welding and numerical analysis



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3 용접 잔류응력 특성

CFRP/Steel 용접 진행시 발생하는 용접 잔류응력을 고려하여 해석을 진행하였다. 용접 잔류응력 해석 시, 열전도 해석에서 얻은 모든 과정의 온도 분포 이력을 데이터로 하여, 열탄소성 프로그램을 사용하여 역학적 특성을 규명고자 하였다.

Fig. 4.3은 잔류응력(상당응력)의 값 분포를 보인 것이다. 해석 조건은 열전도 해석 조건과 동일하게 진행하였고, 용접부 최소 응력은 40.6MPa, 최대 363.9MPa가 발생했으며, 이는 Steel의 항복응력 381MPa의 약 95% 정도 발생함을 알 수 있었다. 최대 응력은 CFRP와 Steel의 접합부를 따라 HAZ 영역에서 발생한 것을 볼 수 있다.

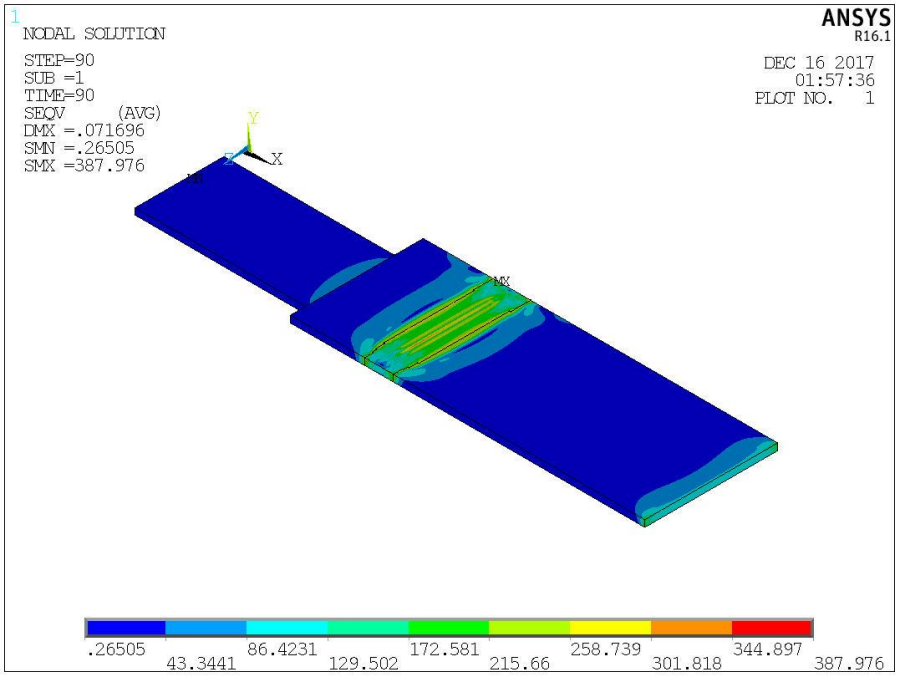


Fig. 4.3 Distribution of welding residual stress generated in welded specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.4는 시험편의 중앙부에서 용접 길이 방향 15mm지점의 폭방향에 따라 용접부 단면에 대한 용접 잔류응력(상당응력)을 나타낸 것으로 용접부를 중심으로 좌우 HAZ부분에서 약 300MPa의 최대 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다.

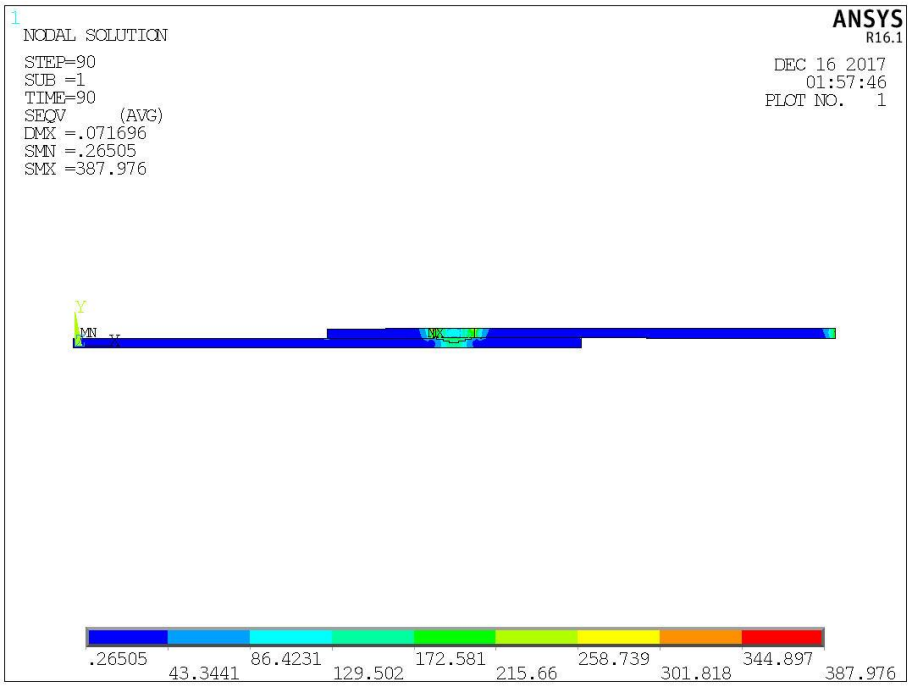


Fig. 4.4 Distribution of welding residual stress in direction of width of welded specimen

Fig. 4.5은 시험편 길이 방향(용접부 횡 방향)의 용접 잔류응력 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 용접 길이 방향 15mm지점의 시험편 길이 120mm에 해당하는 시험편 전역을 나타내었다. 그 결과, HAZ 영역에서 최대 잔류응력에 도달하였으며, 모재로 갈수록 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 용접부의 온도가 상승하면서 팽창함에 따라 주위의 저온 영역이 구속력으로 작용하여 용접부 중심 방향으로 압축응력이 생성됨에 따라 발생한 것이다. 용접이 종료될 때까지 용접부의 온도가 증가함에 따라 재료의 탄성계수, 즉 시편의 강성은 저하되며, 역학적 용융온도 이상으로 온도가 상승하게 되면 용접부의 응력 상태는 Fig. 4.5에 보인 것과 같이 급격히 감소하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4.6은 용접 진행방향의 용접 잔류응력 분포를 나타낸 그래프이다. 용접 길이는 총 30mm로 용접 정 중앙부 영역에 대한 용접 잔류응력 분포를 나타내었다. 이때 용접 시단부로부터 끝단부까지 응력은 전체적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. CFRP와 Steel의 겹침부에서 열에 의해 Steel이 팽창하는 것을 CFRP가 구속하며, 시간이 흐름에 따라 입열량이 증가하면서 잔류응력이이 증가하다가 Cteel과 CFRP의 겹침부 끝 부분에서 최대치를 보이고 있다.

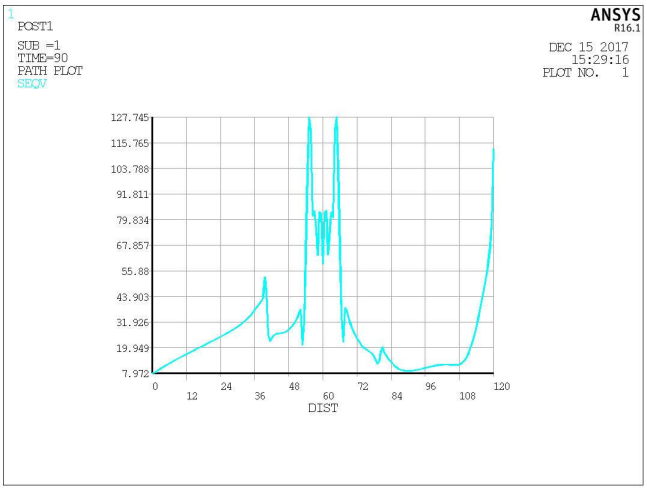


Fig. 4.5 Distribution of welding residual stress along transverse welding direction

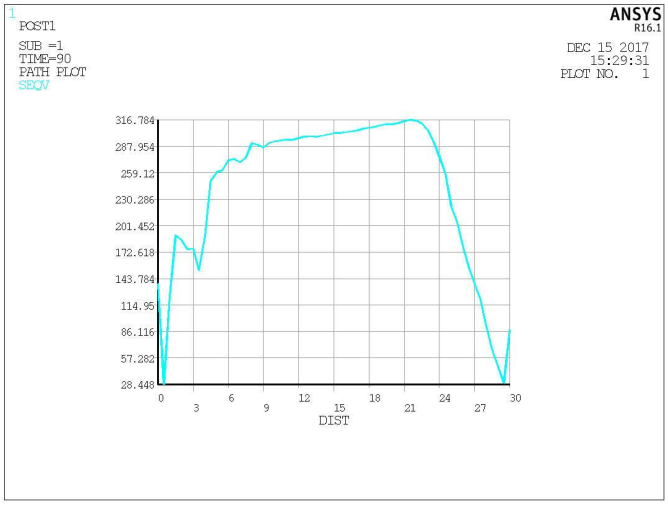


Fig. 4.6 Distribution of welding residual stress along welding direction

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

본 연구에서는 경량 소재인 CFRP66과 DP590강을 Nd:YAG 레이저 용접을 실시하여 용접 특성을 고찰하고자 하였다. 주안점으로는 주요 공정 변수(용접 속도, Defocusing, 표면 조도)가 용접부 강도에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접 속도에 따른 용접 특성을 고찰한 결과, 냉간압연강판의 경우 P : 1000W, V : 5mm/s에서 1.5KN의 전단 인장 강도를 얻을 수 있었으나, 비드에 Pit와 같은 결함이 발생하였다. 이러한 결함이 발생하지 않고, 1.2kN의 강도 값을 확보하였던 7mm/s가 가장 양호한 조건이라고 판단되었다.

2) 초점 위치에 따른 용접 특성을 고찰한 결과, 초점위치 0-15mm까지 변화를 주어 전단인장강도 시험을 진행하였다. 초점위치가 증가함에 따라 열 밀도가 감소하여 CFRP 레진이 과 용융되는 것을 방지하고 융착 면적을 넓혀 초점 위치가 높아짐에 따라 강도 또한 약 0.4kN씩 증가함을 확인하였다. 그 결과 V : 7mm/s, Defocusing : 15mm의 조건에서 1.2kN으로 다소 양호한 강도를 확보할 수 있었다.

3) 표면 조도 유무에 따른 용접 특성을 고찰한 결과, CFRP/SPFC간 실험에서 표면 조도가 주어지지 않은 조건에서의 전단 인장 강도는 1.2kN, 표면 조도가 1.5~2.0㎛ 주어진 조건에서는 1.4kN으로 약 20% 가까이 향상한 것을 전단 인장 강도 시험을 통해 수치상으로 확인하였다. 이는 표면 거칠기로 인해 CFRP 레진이 Steel의 조도를 따라 interlocking 현상이 발생하여 강도가 향상한 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4) 열전도 수치해석을 통한 온도 특성을 고찰해본 결과, CFRP와 Steel의 열전도 차이에 따라 Steel측의 용접부 너비가 CFRP측 보다 넓어진 것을 볼 수 있었다. 그러나 용입 깊이는 CFRP의 낮은 열전도 때문에 속도가 변화하였음에도 큰 차이를 보이지 않음을 수치해석을 통해 확인하였다.

5) 수치해석을 통한 용접 잔류응력 특성을 고찰한 결과, 최대 응력 발생 위치는 용접부를 중심으로 좌우 HAZ부에서 발생했으며 그 수치는 약 360MPa로, Steel의 항복응력인 381MPa의 약 94%해당하는 응력이 발생했다. 또한, Steel과 CFRP의 겹침부에서 CFRP가 Steel에 구속력으로 작용해 응력 수치가 크게 증가함을 확인하였다.

6) Nd:YAG 레이저 용접을 이용하여 이종소재 CFRP와 Steel간의 용접성을 고찰하였다. 이를 통해 용접 공정변수에 따른 용접 특성을 파악하고 아울러 수치해석을 통해 용접부에 대한 온도 및 잔류응력 특성을 고찰하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] Plastic Korea, 폴리아미드 (PA6 및 PA66)의 용도와 시장, 2014. 04. 19

[2] S. J. Moh, 자동차 경량소재 개발 동향 및 완성차 업체 대응, 자동차 경제, 2013. 01.,=

[3] 용접 접합 편람, 철강 및 비철재료, 대한용접접합학회, 2008, 1, pp485-489

[4] K. S. Kim, K. M. Bae, S. Y. Oh, M. K, Kang, C. G. Kang and S. J. Park, 자동차 경량화를 위한 탄소섬유강화 복합재료의 동향, 한국고무학회, Elastomers and composites, 2012, 47-1, pp. 65-74

[5] A. R. Oh, : 무거워진 자동차 탄소섬유로 다이어트 해야., 2016. 02. 25

[6] J. S. Park, J. B. Kim, J. B. Moon, H. K. Jang, S. H. Yoon, 미래 자동차용 다종소재 경량 차체 구조 기술, 재료연구소

[7] Y. M. Kim and H. G. Kim, 경량자동차용 이종소재 접합기술 개발 동향, Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, 2017, 17-6

[8] C. H. Oh, 레이저의 과학, 두양사, 2005

[9] H. J. Kim, 레이저 공학의 기초 및 응용, 부산대학교출판부, 2000

[10] Hitz, 레이저의 기술, 청문각, 2006

[11] 용접 접합 편람, 공정 및 열가공, 대한용접접합학회, 2008, 3, pp133

[12] Y. A. Kim, 탄소체 복합재료, 물리학과 첨단기술, 2003

[13] A. R. Marder, The metallurgy of zinc-coated steel, Progress in material science, 2000, 45, pp.191-271

[14] 포스코 센터, Galvanized steel(용융아연도금강판), 2014, pp5-9

[15] 포스코 센터, Automotive steel(자동차 강판), 2014, pp43

[16] K. W. Jung, Y. Kawahito and S. Katayama, Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to stainless steel, Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16-8, pp676-680

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[17] H.S. Bang, Study on The Mechanical Behaviour of Welded part in thick Plate - Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Analysis Base on Finite Element Method. Journal of the Korean Welding Society, 1992, 10-4, pp.37~43

[18] J. Mazumder, W.M. Steen, J. Appl. Phys. 51, 1980, 941

[19] W. S, Chang, S. J. Na, A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equation and the thermal distortion of a small structure in micro-joining, Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120, pp208-214

[20] J. J. Janosch, International institute of welding work on residual stress and its application to industry, International Journal of Pressure Vessels, 85, pp.183-190

[21] P.O' Regan, Materials Reliability Program : Welding Residual and operating stress in PWR Alloy 182 Butt Welds(MRP-106), EPRI Report

[22] K. W. Jung, Y. Kawahito, M. Takahashi, S. Katayama, Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel, JWRI, 2013, 47, pp179-188

[23] X. Tan, J. Zhang, J. Shan, S. Yang, J. Ren, Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel, Elsevier Composites, 2015, Part B 70, pp35-43

Collection @ chosun