

## 자동차용 1500MPa급 초고강도강의 레이저 용접 특성에 관한 연구

최진강\*, 김종곤\*\*, 신승민\*\*, 김철희\*\*, 이세현\*

\*한양대학교 기계공학과, \*\*한국생산기술연구원

### A Study on Laser Welding Characteristics of 1500MPa Grade Ultra High Strength Steel for Automotive Application

Jinkang Choi\*, Jonggon Kim\*\*, Seungmin Shin\*\*, Cheolhee Kim\*\*, Sehun Rhee\*

\*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

\*\*Advanced Welding&Joining R&D Department, KITECH, Incheon, 406-840, Korea

#### Abstract

In this study, fundamental experiment was conducted with various strength of UHSS (Ultra High Strength Steel) by CO<sub>2</sub> laser. And then, butt and lap joint laser welding with boron alloyed steel and Al-Si coated boron alloy steel have been done by changing laser beam feature, existence of gap and existence of coating layer to know welding characteristics of those materials. As a result, in case of fundamental experiment with various strength steel, hardening was found in the weld metal of all tested materials and softening was found at the heat affected zone of SGAFS 1180. In case of laser butt welding of UHSS, mechanical properties was improved by using small laser beam diameter and Al-Si coating layer caused fracture of weld metal. In case of laser lap welding of UHSS, Al-Si coating layer resulted in formation of intermetallic compound at the fusion boundary where fracture occurred. Al-Si coating layer caused lowering mechanical properties of weld metal.

**Keywords:** Laser welding, laser beam diameter, boron alloyed steel, Al-Si coated boron alloyed steel, hot Stamping steel

#### 1. 서론

최근 환경오염에 대한 규제가 강화되면서 자동차 업계는 연비향상, 환경 오염 물질 배출 억제에 대한 대응이 적극적으로 이루어지고 있다. 특히 차량 경량화를 통한 연비 향상에 많은 관심을 모으고 있으며 이를 위한 수단으로 차체에 경량화 소재를 적용하고 있다. 또한 운전자와 승객 보호를 위한 충돌 안정성 강화 같은 규제가 점차적으로 강화되면서 각종 안전 및 편의장치 부착으로 인해 차량무게가 무거워지는 문제점이 있다. 이에 따라 알루미늄 합금과 특수 강화 플라스틱, 마그네슘과 같은 경량화 소재의 적용이 증가하고 있지만 비용, 접합 특성, 강도 등과 같은 부분에서 철강 소재를 대체하기까지 해결해야 할 문제점을 많이 갖고 있다. 이러한 문제의 해결책으로 높은 강도와 성형성(formability)이 좋은 UHSS(ultra High Strength Steel)의 사용이

요구되고 있다. UHSS는 일반적으로 1,000MPa 이상의 인장강도를 가지는 강재로 DP(dual Phase), TRIP(transformation induced plasticity), CP(complex phase), Martensitic, Boron 강 등이 있다.

앞서 언급한 바와 같이 운전자 보호를 위한 안전성 향상을 위해 차량 충돌 시 차량 구조를 유지 시켜주는 범퍼(bumper), A-필러(pillar), B-필러(pillar) 부분에 1500MPa급 초고강도강(UHSS)의 적용이 유럽자동차시장을 중심으로 증가하고 있으며 점차적으로 북미, 일본으로 그 적용이 확대되어 가고 있다. 이에 따라 UHSS개발과 함께 용접특성 파악 및 용접-접합 향상을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 자동차 차체 접합 방법으로 저항 점 용접이 주로 사용되었지만 새로운 강재가 개발되고 접합 기술도 발전됨에 따라 다양한 접합 기술이 연구되고 있다. 이중에서 레이저를 이용한 접합의 경우 TWB(tailor welded blanks)와 같은 이중두께와 이중

합금의 접합 분야에 많이 적용되고 있다. 레이저 용접은 빠른 용접속도 때문에 현장에서 높은 생산성을 가지며 저입열에 의한 용접 후 변형이 다른 용접공정에 비해 적고 용접 품질의 안정성이 좋다. 위와 같은 장점을 가지고 다양한 연구를 통해 구조 강성이나 변형, 기계적 물성치가 저항 점 용접에 비해 향상됨이 소개된 바 있다.<sup>14</sup> 이와 같이 차체 접합에 있어 레이저 용접의 비중이 커지고 있으며 향후 적용 비중이 확대될 것으로 판단된다. 아울러 자동차에 쓰이는 다양한 강재가 계속해서 개발되고 있고 1500MPa급 초고강도강의 적용이 증가하고 있으며 레이저 용접 기술 또한 지속적인 발전을 거듭하면서 차체 접합에 적용이 증가하고 있다. 따라서 새롭게 개발된 강재나 사용이 증가하고 있는 초고강도강의 레이저 용접 특성에 관한 연구가 요구되고 있고 특성에 따른 적절한 용접 공정 변수 선정에 대한 연구가 요구 된다.

본 연구에서는 레이저가 가지는 광학 케이블(Optic cable), 집속 렌즈(Focal lens)에 따라 빔 특성을 평가하였고 빔 특성에 따라 초고강도강의 레이저 맞대기, 겹치기 용접을 실시하여 그 특성에 대해 알아보하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 선행실험에 따른 고강도강의 레이저 용접 특성

현재 자동차 차체에 사용되고 있는 다양한 강도를 가지는 UHSS에 CO<sub>2</sub> 레이저를 적용하여 선행 실험 후 용접부의 기계적인 특성에 대하여 알아보았다. 레이저 용접 후 빠른 냉각 속도에 의하여 용접부에서 모재 대비 높은 경도 값을 보였으며 탄소당량에 따라 강재의 강도가 높아지면서 열영향부에서 모재 대비 경도 값이 떨어지는 연화 현상을 보였다. UHSS의 레이저 용접 특성을 알아보기 위해 다양한 강도의 소재를 사용하였으며 사용된 소재와 용접속도는 Table 1에서 나타냈다. 맞대기 레이저 용접 실험 후 기계적인 특성을 평가하기 위해 용접부의 경도를 측정하였고 인장시험을 위해 KS B 0801의 규격에 따라 인장 시험편을 가공하였다. Fig. 1에서 보는 것과 같이 용접부의 경도 분포는 모든 소재의 용접금속부에서 경화 현상이 나타났고 소재 강도가 증가할 수록모재와 용접금속부에서 경도 값이 증가하였다. SGAF C 1180 같은 경우 열영향부에서 경도

값이 모재 대비 약 60Hv 정도 감소하며 연화 현상을 보였다. Table 2에서는 모재와 용접부의 인장강도와 파단위치를 나타냈다. RA 590, DP 590, 780의 경우 용접부의 인장강도 값은 모재와 비슷한 결과를 나타냈고 모재에서 파단이 일어났지만 SGAF C 1180의 경우 모재에 비해 낮은 인장강도 결과가 나왔고 파단은 열영향부에서 발생하였다.

Table 1 Experimental material and welding speed

Material	Thickness	Laser power	Welding speed
SPFC DP 590	1.4mm	6kW	7 m/min
SPFC RA 590	1.4mm	6kW	7 m/min
CR DP 780	1.8mm	6kW	6 m/min
SGAF C 1180	1.2mm	6kW	9 m/min

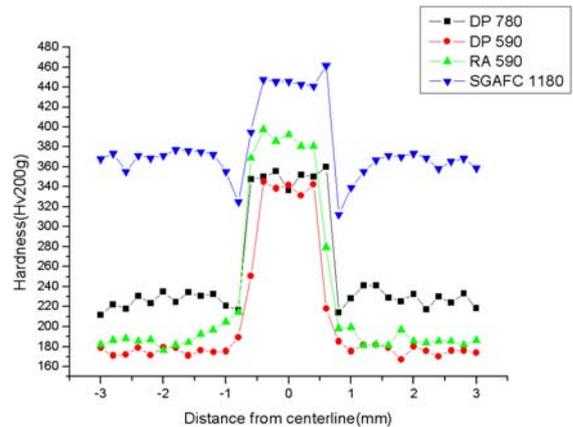


Fig. 1 Hardness distribution of experimental materials.

Table 2 Tensile test result and Failure location

Material	Tensile strength (MPa)		Failure location
	Welded joint	Base metal	
RA 590	640	631	Base metal
DP 590	672	670	Base metal
DP 780	822	842	Base metal
SGAF C 1180	1190	1230	HAZ

### 2.2 핫스탬핑 강 제조 기술

핫스탬핑(hot stamping) 기술은 기존의 UHSS를 이용한 상온 성형법과 달리 강을 고온으로 가열, 고온 성형과 담금질을 유도하는 급랭의 연속공정으로 이루어지며 이를 통해 성형 전 약 500-800MPa급

강도를 지닌 강재를 이용 성형 공정 후 약 1300-1600MPa급의 초고강도 부품을 얻는 신성형 공정법이다. 이 기술은 일반 강이 가지는 고온에서의 우수한 연실율과 낮은 인장강도, 담금질 후 마르텐사이트 변태로 인한 강화를 이용하여 초고강도화, 두께 감소로 인한 부품의 경량화를 동시에 얻을 수 있는 장점을 지닌다.

이와 같은 장점으로 인해 북미 및 유럽의 대부분의 자동차 제조 업체들은 핫스탬핑 기술에 의해 제조된 부품의 적용을 확대해 나가고 있는 실정이다. 최근에는 높은 충격 특성을 필요로 하는 전/후방 범퍼 빔, A-필러, B-필러 등이 핫스탬핑 기술로 제조되어 상당수 자동차에 적용되고 있다. Fig. 2는 핫스탬핑 공정을 개략적으로 나타낸다. 핫스탬핑 기술의 핵심은 고온 성형과 급랭에 의한 변태강화이므로 이에 사용되는 강재는 고온의 오스테나이트상에서 적절한 냉각속도에 의해 마르텐사이트상으로 변태될 수 있는 경화능이 향상된 화학 조성을 가져야 한다.

일반적으로 경화능을 향상시키기 위해서 B, Mn, Cr, Mo 등을 첨가하며 이들 원소의 조성은 경제성과 함께 열처리 후 얻어지는 기계적인 성질을 고려하여 적절히 결정되어야한다.

핫스탬핑 기술에 의한 성형 공정은 900°C 이상의 가열공정을 수반하기 때문에 분위기 가스 등에 의한 산화 방지를 하지 않을 경우 강재 표면의 산화에 의한 스케일(scale) 생성 및 표면 탈탄 현상(decarburization)이 발생하게 된다. 그러므로 가열 전 강재 표면에 산화를 방지하기 위한 (특수한 도금을 하는 등 산화방지 장치가 필수적이고 산화방지를 위해) 알루미늄 도금 강판을 개발하였으며 약 25µm 두께의 Al-Si 층을 형성하고 있다.<sup>5,6</sup>

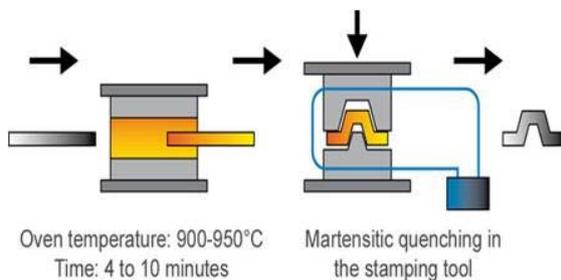


Fig. 2 Schematic diagram of hot stamping process.<sup>6</sup>

### 3. 실험 방법 및 개요

#### 3.1 시편 준비와 제작

용접 실험에서 사용된 소재는 포스코에서 개발, 생산하고 있는 CR boron alloyed steel과 Al-Si coated boron alloyed steel을 사용하였다. 두 소재 모두 핫스탬핑을 위해 제조된 소재로 인장강도가 약 1500MPa의 강도를 가진다.

Al-Si coated boron alloyed steel의 경우 제조 공정과 이송 중 소재 표면의 산화에 의한산화철(iron oxide)의 표면 탈탄 현상을 방지하기 위해 각 면에 약 25µm의 Al-Si 성분의 코팅 층이 존재한다. 각 소재는 폭 70mm, 길이 200mm, 두께 1.5mm의 크기로 가공하였다. 맞대기 용접 시 용접면을 밀링가공을 하였으며 용접 길이는 180mm로 하였다. 겹치기 용접 시에는 겹침 여유를 30mm로 하였으며 용접 길이는 60mm로 하였다. 용접 전 시편 표면의 오염 물질을 제거하기 위해 아세톤 세척 후 사용하였다.

#### 3.2 실험 장치 및 평가 방법

레이저 용접을 위해 Trumpf사의 4kW급 디스크 레이저(disk laser)와 IPG사의 3kW급 파이버 레이저(fiber laser)를 사용하였다. 각 레이저 장치의 헤드를 ABB 6축 로봇에 고정시켜 용접 길이와 용접 속도를 로봇을 통해 제어하였다. 디스크레이저와 파이버 레이저 모두 출력을 3kW로 고정하였으며 보호가스는 사용하지 않았다. 용접 실험에 사용된 고정장치(Jig)는 볼트 형식의 고정장치(bolt type jig)를 사용하였다. 레이저 용접 후 각 시편의 용접 단면의 형상과 용접 금속부 그리고 열 영향부의 폭을 관찰하기 위해 용접 시편을 절단하고 시료를 채취해 폴리싱(polishing) 후 3%-나이탈(nital) 용액을 사용하여 에칭(etching)하였다. 용접 단면에서 균열, 기공과 같은 결함을 살펴보고 인장 시험 후 파단면을 관찰하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscope)을 이용하였다. 용접부의 기계적 특성을 알아보기 위해 경도 측정과 인장강도 시험을 실시하였다. 경도 측정을 위해 마이크로 비커스 경도계를 이용하였으며 측정하중은 200g, 하중 지속시간은 10sec, 측정 간격은 200µm로 설정하고 측정하였다. 인장시험 시 KS B 0801 규격에 의거하여 시험편을 가공하였다.

#### 3.3 실험에 사용한 레이저 빔 특성 평가

디스크 레이저와 파이버 레이저를 사용하여 레이저의 종류, 광학 케이블(optic cable), 집속 렌즈

(focal lens)에 따라 각각 생성되는 빔의 특성을 파악하고 레이저 용접 실험에 사용하고자 하였다. Prime의 focus monitor 장치를 이용하여 각 빔의 특성을 파악하였다. Table 3는 빔 특성 평가에 사용된 레이저 종류, 광학 케이블, 집속 렌즈를 명시 하였고 그에 따른 레이저 빔의 직경과 에너지 밀도를 나타내었다.

**Table 3** Measured beam diameter and energy density

No.	Laser	Optic cable	Focal lens	Beam diameter	Energy density
1	Fiber	100 $\mu$ m	200mm	0.17mm	3306 kW/cm <sup>2</sup>
2	Disk	200 $\mu$ m	220mm	0.25mm	1528 kW/cm <sup>2</sup>
3	Fiber	200 $\mu$ m	300mm	0.36mm	737 kW/cm <sup>2</sup>
4	Disk	200 $\mu$ m	560mm	0.54mm	327 kW/cm <sup>2</sup>

### 4. 실험 결과 및 고찰

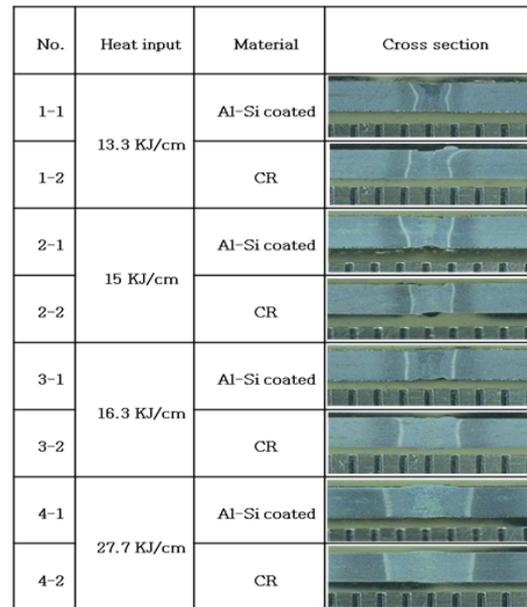
#### 4.1 레이저 빔 특성에 따른 초고강도강의 맞대기 용접 특성

##### 4.1.1 레이저 빔 특성에 따른 용접속도와 단면 형상

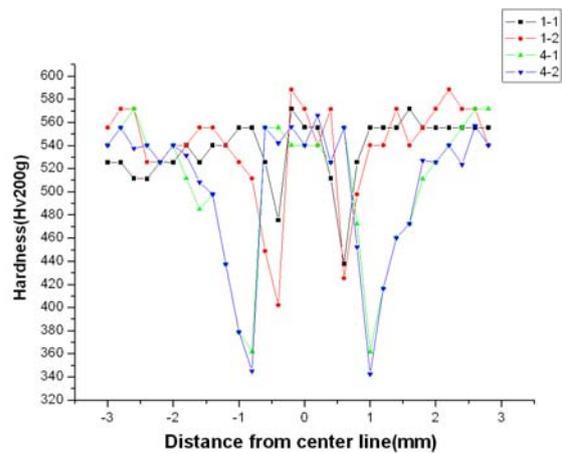
Focus monitor를 이용해서 측정된 레이저 빔 특성에 따라 소재 별 맞대기 실험을 실시하여 완전 용입 시 최대 용접 속도를 측정하였고 그에 따른 용입 현상을 단면을 통해 관찰하였다. Table 4는 레이저 빔 직경에 따라 측정 된 최대 용접 속도를 나타낸다. 레이저 빔의 직경이 커질수록 단위 면적의 에너지 밀도는 작아지므로 용접 속도는 감소하게 된다. 그에 따라 단위 길이당 입열량은 증가하여 Fig. 3에서 보는 것과 같이 용접 금속부와 열 영향부의 폭이 넓어진다. Table 4에 1-1의 조건에서 빔 직경이 가장 작은 0.17mm으로 13.5m/min의 가장 빠른 용접 속도로 측정 했으며 상대적으로 가장 적은 단위 길이당 입열로 인한 용접 금속부와 열 영향부가 가장 좁게 나타났다. 코팅층의 유무에 따라 용접 금속부나 열 영향부의 폭에 미치는 영향은 없었고 입열량이 갑자기 증가한 4-1, 4-2 조건에서 용접 금속부와 열 영향부의 폭이 1-1, 1-2의 조건에 비해 약 2배 정도 증가함을 확인하였다.

**Table 4** Max. welding speed according to beam diameter

No.	Laser	Beam diameter	Material	Welding speed
1-1	Fiber	0.17mm	Al-Si coated	13.5m/min
1-2			CR	
2-1	Disk	0.25mm	Al-Si coated	12m/min
2-2			CR	
3-1	Fiber	0.36mm	Al-Si coated	11m/min
3-2			CR	
4-1	Disk	0.54mm	Al-Si coated	6.5m/min
4-2			CR	



**Fig. 3** Cross section of butt joint and heat input.



**Fig. 4** Comparison of hardness distribution of butt joint.

4.1.2 레이저 빔 특성에 따른 용접부의 기계적 성질

입열량에 따라 최대 용접 속도로 실험한 용접부의 기계적인 특성을 알아보기 위하여 각 조건별 경도 분포를 측정하였다. 레이저의 빔 직경이 커짐에 따라 입열량이 증가하였고 이에 따라 넓은 폭의 열 영향부가 생성되었다. 또한 열 영향부의 경도 값이 빔의 직경이 커짐에 따라 감소하여 연화의 정도가 심화됨을 알 수 있었다. Fig. 4은 레이저 빔 직경이 0.17mm로 가장 작은 경우와 0.54mm로 가장 큰 경우에 대한 용접부 경도 분포를 비교한 것이다. 레이저 빔 직경이 작으면 빠른 용접 속도에 의해 입열량이 적어 경포 분포에서 보는 것과 같이 좁은 열 영향부를 보이게 된다. 반대로 레이저 빔 직경이 크면 입열량이 크기 때문에 열 영향부의 폭이 넓게 분포 되는걸 알 수 있고 레이저 빔이 작은 경우와 비교해 최소 경도 값이 약 100Hv 감소함을 알 수 있다. Fig. 5은 용접 금속부의 경화를 의미하는 최대 경도 값과 열 영향부의 연화를 의미하는 최소 경도 값을 모재의 경도 값과 비교한 그래프이다. (레이저 빔의 직경이 변화는 조건에 따라 최대 경도 값의 미치는 영향은 크지 않았지만) 레이저 빔의 직경이 커짐에 따라 최소 경도 값은 감소하여 열 영향부에서의 연화 현상이 심화됨을 알 수 있었다. Fig. 6은 인장강도 값과 파단 면의 위치를 보여 주고 있다. 레이저 빔 직경의 변화에 관계 없이 코팅층이 없는 CR강 소재와 Al-Si 코팅층이 존재한 소재의 인장강도를 비교 했을 때 CR강 소재에서 더 높게 측정 되었다. 레이저 빔의 직경이 가장 큰 경우와 가장 작은 경우를 비교해 봤을 때 CR강 소재에서 열 영향부의 감소에 따른 기계적 성질이 향상되어 인장 강도가 약 10% 향상됨을 알 수 있었다. 레이저 빔 직경이 작고 용접 속도가 빠르며 Al-Si 코팅층이 존재하는 1-1과 2-1의 조건에서 용접부를 포함한 파단이 발생 하였으며 이러한 원인은 파단면의 SEM 촬영을 통해 알아보았다.

4.1.3 파단면 관찰 및 EDS 분석

레이저 빔의 직경이 작기 때문에 입열량이 작은 조건에서 좁은 용접 금속부를 형성하였고 이 때 용접부를 포함한 파단이 발생하였다. 위 조건 모두는 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재이며 이런 코팅층이 파단에 영향을 미친다고 판단하여 SEM을 통해 파단면을 관찰하였다.

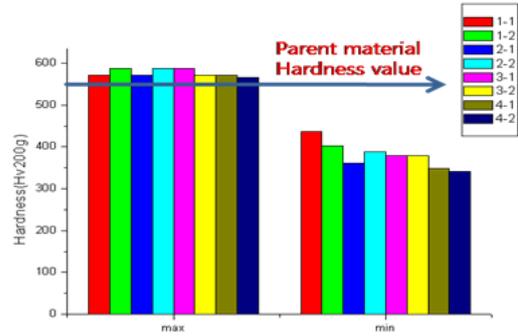


Fig. 5 Maximum and minimum hardness value versus parent material.

No.	Material	Tensile strength	Failure section	Failure position
1-1	Al-Si coated	1243.5MPa		WM
1-2	CR	1491.6MPa		HAZ
2-1	Al-Si coated	1350.4MPa		WM
2-2	CR	1408.7MPa		HAZ
3-1	Al-Si coated	1405.8MPa		HAZ
3-2	CR	1411.2MPa		HAZ
4-1	Al-Si coated	1313.7MPa		HAZ
4-2	CR	1348.4MPa		HAZ

Fig. 6 Tensile strength, Failure section and position of butt joint.

Fig. 7의 관찰 결과 파단부에서 코팅층에 의해 형성된 것으로 보이는 개재물이 발견 되었으며 Al-Si 코팅층의 영향 여부를 확인하기 위해 개재물 부위의 성분 분석을 하였다. 분석 부위에서 Al, Si 성분이 다른 용접부에 비해 많이 검출 되었으며 이는 코팅층의 영향이라고 판단된다. 이러한 개재물은 높은 경도 값을 가지며 취성이 높다. 따라서 개재물의 영향으로 용접부의 기계적 특성에 영향을 미친다고 판단된다.

4.2 레이저 빔 특성에 따른 초고강도강의 겹치기 용접 특성

4.2.1 레이저 빔 특성에 따른 용접 속도와 단면 형상

맞대기 용접 실험과 마찬가지로 focus monitor를

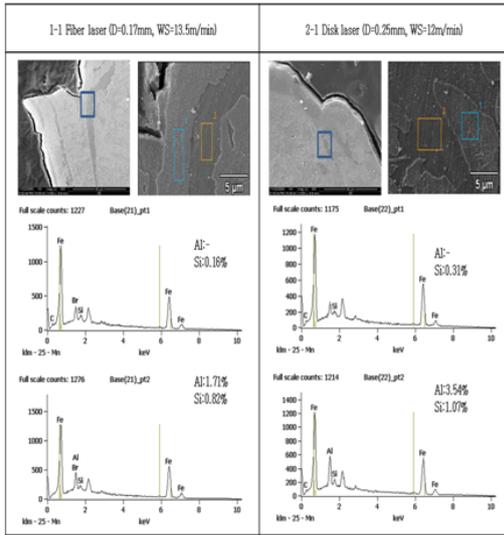


Fig. 7 Observation of butt joint failure section with SEM and EDS analysis.

Table 5 Max. welding speed of lapjoint according to beam diameter

No.	Laser	Beam diameter	Material	Gap	Welding speed
1-1			Al-Si coated	0mm	
G-1-1	Fiber	0.17mm	Al-Si coated	0.2mm	7m/min
1-2			CR	0mm	
2-1			Al-Si coated	0mm	
G-2-1	Fiber	0.36mm	Al-Si coated	0.2mm	4m/min
2-2			CR	0mm	
3-1			Al-Si coated	0mm	
G-3-1	Disk	0.54mm	Al-Si coated	0.2mm	1.5m/min
3-2			CR	0mm	

이용해서 측정된 레이저 빔 특성에 따라 소재 별 겹치기 실험을 실시하여 완전 용입 시 최대 용접 속도를 측정하였고 그에 따른 용입 현상을 단면을 통해 관찰하였다. Table 5은 겹치기 용접에서 레이저 빔 직경과 Al-Si 코팅강의 갭의 유무에 측정된 최대 용접 속도를 나타내었다.

레이저 빔의 직경이 커질수록 단위 면적의 에너지밀도는 작아지므로 용접 속도 또한 감소하게 된다. 따라서 단위길이당 입열량은 증가하여 Fig. 8에서 보는 것과 같이 용접 금속부와 열 영향부의 폭이 넓어진다. 1-1 조건의 레이저 빔의 직경은 0.17mm으로 7.0m/min의 가장 빠른 용접속도가 측정되었다.

No.	Heat Input	Welding speed	Material	Cross Section
1-1	25.7 KJ/cm	7.0m/min	Al-Si coated	
G-1-1			Al-Si coated	
1-2			CR	
2-1	51.4 KJ/cm	3.5m/min	Al-Si coated	
G-2-1			Al-Si coated	
2-2			CR	
3-1	120.0 KJ/cm	1.5m/min	Al-Si coated	
G-3-1			Al-Si coated	
3-2			CR	

Fig. 8 Cross section of lap welded.

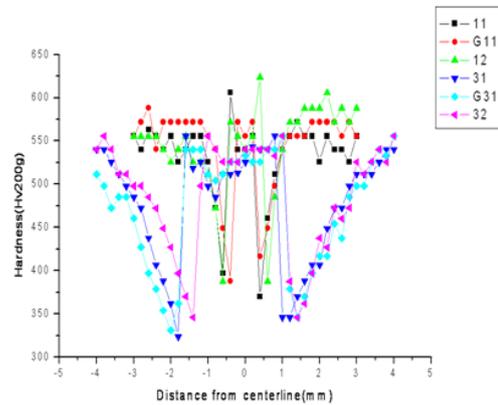


Fig. 9 Comparison of hardness distribution of lap joint.

1번과 2번 조건에서는 상판과 하판의 열 영향부의 폭이 차이가 크지 않지만 3번 조건의 경우 입열량이 급격하게 증가하면서 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재와 CR강 소재에서 열 영향부의 폭이 급격하게 증가하였고 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재의 경우 상판의 열 영향부가 하판의 열 영향부 보다 훨씬 넓게 생성되어 강도가 저하됨을 예측할 수 있었다.

4.2.2 레이저 빔 특성에 따른 용접부의 기계적 성질

입열량에 따라 최대 용접 속도로 실험한 겹치기 용접부의 기계적인 특성을 알아보기 위하여 각 조건 별 경도 분포를 측정하였다. 레이저의 빔 직경이 커짐에 따라 입열량 증가로 넓은 폭의 열 영향부에서 경도 값이 감소하는 것을 알 수 있었

고 연화의 정도가 심화됨을 알 수 있었다. Fig. 9 은 레이저 빔 직경이 가장 작은 경우(0.17 mm)와 가장 큰 경우(0.54mm)에 대한 용접부 경도 분포를 비교한 것이다.

레이저 빔 직경이 작으면 빠른 용접 속도에 의해 입열량이 적어 경도 분포에서 보는 것과 같이 좁은 열 영향부를 보이게 된다. 하지만 갭에 따른 경도 분포의 차이는 나타나지 않았다.

No.	Material	Tensile strength	Failure section	Failure position
1-1	Al-Si coated	9,081 N		Fusion boundary
G-1-1	Al-Si coated - 0.2 gap	10,128 N		Fusion boundary
1-2	CR	11,935 N		Interfacial
2-1	Al-Si coated	13,255 N		Fusion boundary
G-2-1	Al-Si coated - 0.2 gap	13,572 N		Fusion boundary
2-2	CR	17,102 N		Fusion boundary
3-1	Al-Si coated	15,735 N		Fusion boundary
G-3-1	Al-Si coated - 0.2 gap	16,817 N		Fusion boundary
3-2	CR	19,455 N		Fusion boundary

Fig. 10 Tensile strength, Failure section and position of lap welded.

Fig. 10에서 보는 것과 같이 전단 하중 시험 결과 갭의 유무에 관계없이 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재는 모두 fusion boundary에서 파단이 일어났다. CR강 소재의 경우 1-2, 2-2 조건은 계면에서 파단이 이루어졌으나 3-2 조건은 계면의 길이가 1mm보다 커지면서 열 영향부의 연화 현상에 더 많은 영향을 받아 열 영향부에서 파단이 발생하였다. 겹치기 용접의 경우 레이저 빔의 직경이 커지면서 전단 하중은 증가하는 경향을 보여 레이저 빔 직경의 변화에 의한 용접 금속부와 열 영향부 폭의 감소는 기계적 성질 향상에 영향을 주지 못했다. Al-Si 코팅층이 존재하는 소재에서는 모든 조건에서 갭이 있는 용접부에서 전단하중 값이 더 높게 나타났다.

### 4.2.3 파단면 관찰 및 EDS 분석

4.2.2에서 살펴본 바와 같이 레이저 빔 특성에 따른 겹치기 용접 결과 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재의 경우 레이저 빔 특성이나 갭의 유무에 상관 없이 모두 fusion boundary에서 파단이 발생하였으며 이는 맞대기 용접과 마찬가지로 Al-Si 코팅층의 영향으로 생긴 높은 취성의 개재물 때문이라고 판단되어 파단면을 SEM을 통해 관찰 하였다.

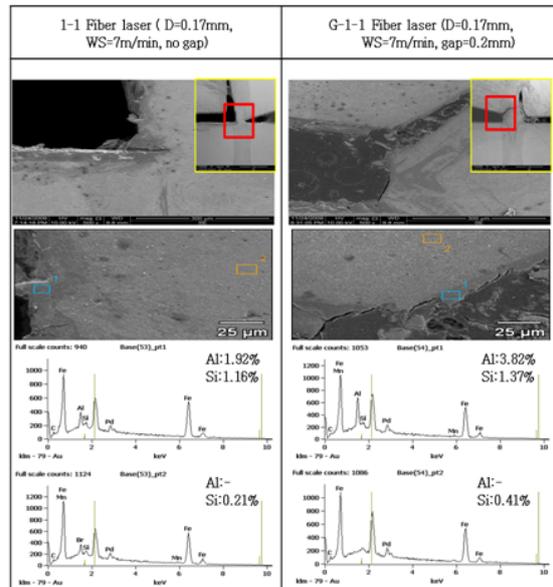


Fig. 11 Observation of lap welded failure section with SEM and EDS analysis (0.17mm).

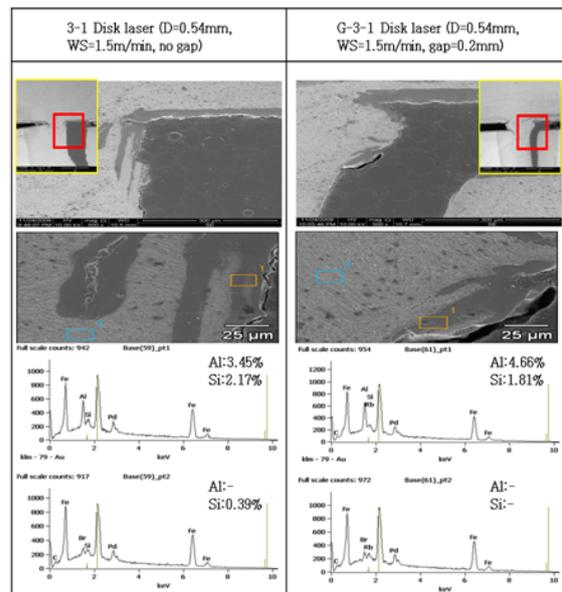


Fig. 12 Observation of lap welded failure section with SEM and EDS analysis (0.54mm).

Fig. 11, 12에서 보는 것과 같이 파단면에서는 개재물로 보이는 부위가 발견 되었으며 EDS 분석을 통해 Al과 Si 성분이 다른 용접부에 비해 많이 검출됨을 확인 하였다. 맞대기 용접부와 마찬가지로 코팅층의 영향으로 생성된 개재물은 겹치기 용접부의 기계적인 특성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 다양한 강도를 가지는 UHSS 소재를 가지고 레이저 기초 실험을 수행하였으며 그 내용을 바탕으로 1500MPa급 초고강도강의 레이저 용접 특성에 대해 알아보하고자 하였다. 레이저 빔의 특성, 용접 이음부, 코팅층의 유무 등과 같은 영향을 알아보하고자 맞대기, 겹치기 레이저 용접 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 기초 실험을 통해 레이저의 빠른 용접 속도가 용접 금속부의 경화 현상에 영향을 주었고 소재의 강도가 높아지면 열 영향부에서 연화 현상이 발생함을 확인하였다.
- 2) 맞대기 용접 결과 레이저 빔의 직경이 작아짐에 따라 용접 속도는 증가하였고 단위 길이당 입열량은 줄어들어 용접 금속부와 열 영향부의 폭은 감소하였으며 기계적 성질이 향상 되었다. 레이저 빔의 직경이 0.17mm인 경우에 비하여 레이저 빔의 직경이 0.54mm인 경우 60%정도 인장하중이 향상됨을 확인하였다. 레이저 빔 직경에 따른 맞대기 실험에서 용접부 경화에 대한 영향은 미미하였으나 열 영향부의 연화는 빔의 직경이 커질 때 입열량이 커지므로 점차 적으로 심화 되는 것을 확인 하였다. Al-Si 코팅층이 존재하는 소재의 맞대기 용접 시 빔 직경이 상대적으로 작은 0.17mm, 0.25mm의 조건에서 인장시험 결과 용접부에서 파단이 생겼으며 이는 SEM 촬영 결과 Al-Si 코팅층에 의해 생성된 취성이 높은 개재물이 상대적으로 좁은 용접 금속부에 형성되었기 때문에 판단 된다.
- 3) 겹치기 용접 시 맞대기의 경우와 마찬가지로 레이저 빔의 직경이 작아짐에 따라 용접 속도는 증가하였고 용접부와 열 영향부의 폭은

감소하였으나 기계적인 강도 향상에 영향을 주지 못하였다. 겹치기 용접 시 Al-Si 코팅층이 존재하는 소재의 경우 모든 조건에서 용접부와 열영향부 사이에 생성된 개재물에 의하여 적절한 전단강도를 확보하지 못했다. CR강 소재의 경우 계면의 길이가 전단강도에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. Al-Si 코팅 보론강의 용접시 전단강도의 확보를 위해서는 Al-Si 코팅층의 제거가 필요하며 제거 후 용접부의 기계적 성질은 CR강 소재와 비슷한 기계적 성질을 보일 것으로 판단된다. 따라서 1500MPa급 초고강도강의 Al-Si 코팅층의 효과적인 제거에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

## 참고문헌

- 1) S. G. Shi, S. Westgate : Fiber-Delivered Laser Welding of Ultra-High Strength Steels for Automotive Applications, TWI Report, 865 (2007)
- 2) C. M. Allen : Twin Spot Laser Welding for Dissimilar Thickness Steel Tailored Blanks, TWI Report, 793 (2004)
- 3) F.Briand, O.Dubet, P.Lefebvre, G.ballerini, K. Niki : Laser and Hybrid Welding of Ultra High Strength Steels, Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, (2006)
- 4) K. Harley, H. Haferkamp, A. Ostendorf : Inductively Supported Laser Beam Welding of High and Ultra Strength Steel Grade, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Laser Material Processing Conference, 1401 (2008), 589-594
- 5) M. Suehiro, K. Kusumi, T. Miyakoshi : Properties of aluminum-coated steels for hot-forming, Nippon steel technical report, No.88 (2003), 16-21
- 6) Arcelor : Usibor 1500P Technucal report of Arcelor (2003)