

## 자동차용 무침입형 극저탄소강의 파이버 레이저 용접에 대한 연구

오용석\*, 신호준<sup>+</sup>, 양윤석<sup>++</sup>, 황찬연<sup>++</sup>, 유영태<sup>+++</sup>

(논문접수일 2010. 06. 11, 심사완료일 2011. 03. 28)

### A Study on the Fiber Laser welding of Ultra-Low Carbon Interstitial Free Steel for Automotive

Yong-Seok Oh\*, Ho-Jun Shin<sup>+</sup>, Yun-Seok Yang<sup>++</sup>, Chan-Youn Hwang<sup>++</sup>, Young-Tae Yoo<sup>+++</sup>

#### Abstract

The purpose of this paper is to describe experimental results about the butt welding and bead on plate welding of the high power Continuous Wave (CW) Fiber laser for Ultra-low carbon Interstitial Free(IF) steel plate for gear part of car. After being welded of the gear parts by the fiber laser and electron beam Microstructures of melting zone had been mixed acicular, granular bainitic, quasi-polygonal and widmanstatten ferrite because of a radical thermal diffusion after welding, difference of critical volume and grain size. As a result of experiment, when gear parts were welded by the fiber laser and electron beam, the fiber laser welding has been stable properties without internal defects more than the electron beam welding. Therefore it has the very advantages of welding high quality and productivity more than conventional melting method. The optimal welding processing parameters for gear parts were as follows : the laser power and welding speed were 3kWatt, 30mm/sec respectively. At this time heat input was  $21.2 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ .

**Key Words** : Fiber laser(파이버 레이저), Ultra-low Carbon Interstitial free steel(무침입형 극저탄소강), Heat input(입열량), Microstructure(미세조직), X-ray CT Analysis(X-ray CT 분석), Electron beam welding(전자빔 용접)

## 1. 서론

산업현장에서 다품종 소량생산에 적합한 유연생산과 고품질의 요구가 높아짐에 따라 독일, 미국, 일본 등에서 레이저용접이 자동차 관련 산업뿐만 아니라 조선, 항공 산업까지 다양하게 적용되고 있다.

자동차 산업에서의 레이저용접 분야는 대략적으로 부품용접<sup>(1)</sup>, 차체용 강판 용접<sup>(2)</sup>, 이중두께(Tailored Blank) 용접<sup>(3)</sup> 등

으로 분류할 수 있다. 자동차용 파워트레인은 주행 및 변속시 충격하중을 받게 되므로 높은 인성 및 강도가 요구된다. 특히 용접 후 소재에 발생하는 열변형은 주행시 진동 및 소음 발생의 원인이 되므로 용접 후 열변형이 극소화되어야 한다. 이러한 측면에서 자동차용 기어소재를 사용함과 동시에 고밀도에너지 열원에 의해 용접을 실시하고 있다.

\* 조선대 첨단부품소재공학과  
+ 조선대 레이저가공연구실  
++ 조선대 첨단부품소재공학과  
+++ 교신저자, 조선대학교 메카트로닉스공학과 (ytyou@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

본 연구에서 사용된 IF(Interstitial Free)강은 자동차용 기어 소재로 성형성이 우수한 대표적인 고강도 극저탄소강(Ultra low carbon steel)이다. 탄소의 함유량이 100ppm 이하의 극저탄소강에 강도를 향상시키기 위해 티타늄(Ti) 또는 니오븀(Nb)와 같은 탄화물 또는 질화물 형성원소를 일정한 비율 이상 첨가하여 철(Fe)기지 중에 침입형원소(Interstitial atom)인 탄소, 질소, 황 등이 고용상태가 아닌 미세한 석출물로 결정립을 미세화 시켜 고성형용강·고강도강으로 개발되었다<sup>(4-5)</sup>. 그러나 일반적으로 탄소강을 용접했을 때는 용접 후 열화에 따라 기계적 특성이 저하되고, 미세조직이 용융 후 급격한 온도변화에 의해 금속학적 특성이 달라진다. 때문에 용접부는 크게 균열 및 기공과 같은 문제점이 많이 발생한다.

국내 자동차 기어부품의 생산 공정은 프레스 성형으로 가공된 기어류 후판 소재 부품을 강도가 크고 정밀도가 높은 용접을 하기 위해 전자빔 용접을 사용하고 있다. 그러나 전자빔 용접은 대기 중의 도전입자에 의해 전자빔이 산란되므로  $5 \times 10^{-2}$  torr 이상의 고진공 상태에서 용접이 진행되기 때문에 용접을 위한 진공설비비가 비싸며, 고진공 상태를 유지하기 위해 많은 시간을 필요로 한다. 그러므로 생산성 측면에서 불리할 뿐만 아니라, 진공의 상태에 따라 용접품질이 달라지는 단점이 있다.

최근에는 이런 전자빔 용접의 단점을 보완하고 생산성 향상 및 원가절감의 대책으로 전자빔 용접공정을 레이저 용접으로 대체 하려는 연구가 진행되고 있다<sup>(6)</sup>.

일반적으로 레이저 용접품질은 소재에 대한 레이저빔의 흡수율과 반사율 측면에서 파장과 발진형태에 따라 달라진다. 그중 고출력 파이버(Fiber) 레이저는 파이버를 이용하여 발진하기 때문에 고출력 Nd:YAG 레이저에 비해 소형이고 빔 품질(Beam quality)이 좋을 뿐만 아니라 낮은 전력 소모로 레이저빔을 발진하고 있어 산업계에서 많은 관심이 집중되고 있다<sup>(7-8)</sup>. 특히 파이버레이저는 소형의 모듈 개념으로 설계되어 있어 특정 모듈의 고장 시 예비모듈로 자동적으로 교체된다. 그러므로 레이저 출력이 저하 없이 장비를 사용할 수 있어 산업 현장에서 유연성이 뛰어나다. 그리고 열에 강하고, 먼지의 영향이 없으며, 광학적 정렬이 필요 없는 특징을 가진다.

본 연구에서는 전자빔과 같은 고밀도 에너지빔인 레이저빔을 이용하여 비드온플레이트 용접(Bead on plate welding)성에 대해 고찰하고 최적의 용접공정 조건을 얻고자하였다. 그리고 현재 자동차용 기어부품의 맞대기 용접에 적용되고 있는 전자빔용접을 고출력 파이버 레이저로 대처하기 위한 최적의 공정조건을 획득하고자 한다.

최적의 공정조건 선별은 현재 전자빔 용접된 시험편의 용입 깊이를 측정한 결과와 근접한 공정변수를 선정하였다. 용접성에 영향을 미치는 레이저 출력, 용접속도 등의 공정을 실험적으로 연구하여 최적의 공정변수를 제시한 후 입열량의 변화, 내부결합 빈도수 및 경도를 측정하여 맞대기 용접의 최적 공정변수를 결정하였다. 그리고 전자빔 및 레이저에 의해 용접된 용접부의 단면형상을 3차원적으로 분석하여 용접성을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 레이저는 최대출력이 5kWatt 인 연속파형(Continuous wave ; CW) 파이버 레이저이며, 파이버의 직경이 300 μm 인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 이때 레이저 용접헤드의 렌즈의 초점거리 F=300mm 이고, 초점직경(Spot diameter)은 0.6mm 이다.

Fig. 1은 파워트레인에 사용되는 기어부품을 용접하기 위한 레이저 시스템의 모식도이다. 기어부품의 용접부가 회전축을

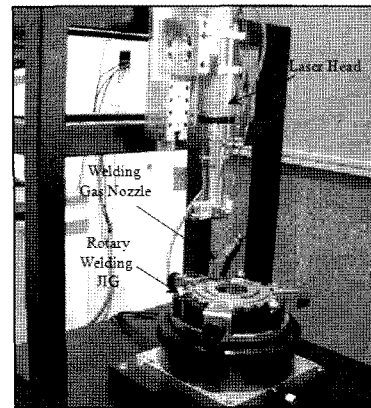


Fig. 1 Laser system for gear welding

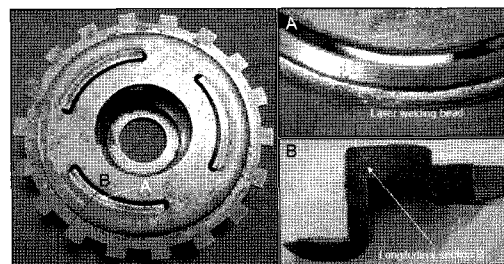


Fig. 2 Gear of power train and welding parts

Table 1 Chemical components of specimens(wt%)

	C	Mn	S	P	Si	Al	Cr	Ni	N	Nb	Fe
IF steel	0.003	0.40	0.007	0.06	0.015	0.036	0.033	0.012	0.0035	0.046	Bal.

중심으로 일정한 위치에 형성되어 있어 레이저빔을 고정하고 소재가 회전하는 구조로 시스템을 구성하였다. 용접속도(Welding speed( $W_s$ ): mm/sec)는 로터리 회전 지그(Jig)에 기어를 장착하여 시편을 회전시키는 방법으로 조절하였다.

용접부의 산화방지 및 용접 분위기조성을 위한 보호가스 공급 노즐을 설치하였다. 실험에 사용된 지그 및 레이저 용접 장치는 Fig. 2에 나타내었다.

기존 생산라인에 적용하는 전자빔 공정은 비공개 자료이므로 전자빔에 의한 용접된 기어의 용입깊이를 분석한 결과 평균 4~4.5mm 이었다. 그러므로 이와 유사한 입열량을 갖는 용접 공정을 찾고자 하였다.

선행 실험으로 파이버 레이저에 대한 용접특성을 분석하기 위해 비드온플레이트 용접을 실시하였고, 이를 토대로 실제 기어샘플에 적용하여 레이저 용접을 실시하였다. 비드온플레이트 용접은 초점위치를 고정시킨 후 레이저빔의 출력과 용접속도를 변화시켰다. 이때 각각의 공정변수는 3, 4, 5kWatt와 30~110mm/sec 이었다. 맞대기 용접에 사용된 공정은 비드온플레이트 용접시 얻어진 용입깊이, 입열량 관계를 고려하여 용접하였다.

각각의 공정변수 변화에 대한 용접부를 분석하기 위해 와이어와 정밀금속절단기[Isomet 4000 precision saw]를 이용하여 용접시편을 절단한 후 사포로 연마 및 폴리싱 후 Nital 5%로 에칭 하였다. 에칭된 용접부 경계면은 광학현미경[Olympus]으로 관찰하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기[Simadzu : H MV-2series]를 사용하여 0.3kg의 하중을 적용시켰다.

## 2.2 실험재료

실험에 사용된 소재는 자동차 파워트레인의 기어부품 소재의 일종으로 내·외부에 발생하는 외란(Disturbance)의 영향을 받지 않아야 하기 때문에 고인성과 고강도의 특성을 가지고 있다. 그러나 파워트레인의 구조상 복잡한 형상을 가지므로 각각의 부품을 결합하는 용접공정이 필수적이다. 때문에 용접 후 나타나는 용접부의 기계적 특성과 야금학적 특성이 고찰했다. 특히 탄소의 함유량을 극소량으로 유지한 채 침입형 원소를 첨가하여 인성과 강도가 우수한 소재이므로 일반 저탄소강의 용접부 미세조직과 그 특성이 다르게 나타난다.

실험에 사용된 시험편은 실제 기어부품을 절단한 채취하였고, 두께가 8mm 이고, 화학조성은 Table. 1과 같다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 비드온플레이트 용접특성

고밀도 에너지 열원인 레이저빔은 금속 표면에 흡수되는 표

면열원의 변화 및 각종 매개 변수들에 의해 가공 특성이 달라진다. 레이저 용접은 키홀(Key hole)현상이 나타나기 때문에 다른 가공방법보다 레이저빔의 집속 조건과 인입되는 에너지의 양에 따라 물리적인 변화와 야금학적인 특성이 크게 달라진다. 그러므로 용접변수를 적절하게 유지하지 않으면 열 변형과 용접 결함 등이 발생하게 되어 용접부의 기계적 특성을 저하시킨다.

본 연구는 최적의 용접 공정변수를 선정시 레이저빔이 재료 표면에 흡수된 입열량을 분석하기 위해 식 (1)로 계산하여 비교하였다. 용접속도에 따른 단위면적당 에너지 밀도, 즉 입열량( $E : J/cm^2$ )식은 다음과 같다.

$$E = \frac{A \cdot D}{\pi r^2} \times \frac{P}{v} \quad (1)$$

A는 금속의 레이저빔 흡수율(%), D는 레이저빔이 시편표면에 조사된 초점직경, P는 레이저빔 출력, r은 레이저빔 조사반경, v는 용접속도이다<sup>(9)</sup>. 이때 레이저 빔의 흡수율(A=100%)은 고려하지 않았다. 이는 어느 일정한 에너지 밀도 이상( $\approx 10^6 W/cm^2$ )이 되면 다중흡수 현상인 키홀이 나타나게 되어 흡수율을 증가시키기 때문이다.

Fig. 3은 IF강에 비드온플레이트 용접 한 후 용접속도에 대한 용입깊이 변화를 나타냈다. 초점위치(Focal position or defocused length)와 보호가스(Shielding gas)은 각각 0mm (Focal length : 300mm), 아르곤(Ar : 10l/min)으로 유지한 후 레이저 출력과 용접속도를 달리하여 실험을 진행했다.

그 결과 용입속도가 감소하고 레이저 출력이 증가함에 따라 용입깊이는 증가한다. 이때 증가율은 약 119% 이상이다. 이것은 레이저빔과 재료와의 상호작용시간이 길어져 시편에 반사되는 에너지양보다 흡수되는 에너지가 많아진다. 그럼으로써 키홀의 형성에 필요한 인입되는 에너지흡수가 원활하게 이루

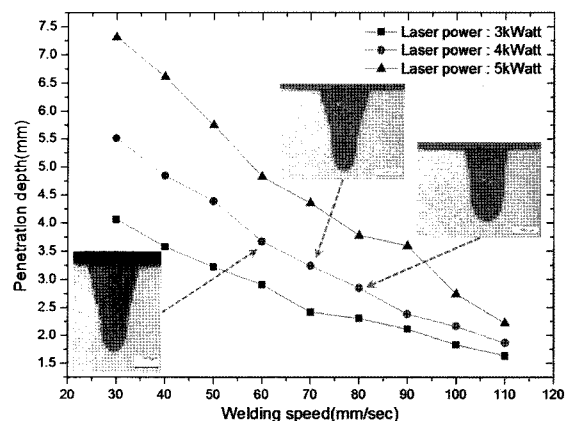


Fig. 3 Variation of penetration depth for laser powers and welding speeds

어지기 때문이다. 그러나 점차 용입속도가 증가하게 되면 용입 깊이의 증가율은 점차적으로 줄어들어 약 54% 이하 정도가 된다.

앞서 언급했듯이 탄소강은 여러 가지 내·외부적인 요인으로 결함이 발생한다. 내부적인 요인으로는 제조 공정에서 발생하는 기지(Substrate)내의 기공과 용접공정과 같은 외부적인 요인에 의해 발생하는 고온응고균열과 용접부의 내부기공 등이 있다.

Fig. 3에서 보듯이 레이저 출력이 4kWatt 일 때 용접속도가 60mm/sec 일 때 발생되지 않은 용접부의 내부균열이 용접속도가 각각 70, 80mm/sec 에서 발생하였다. 레이저 출력이 5kWatt일 때는 용접속도가 각각 90, 100, 110mm/sec 일 때 내부결함이 발견됐다. 하지만 레이저 출력 3kWatt 에서는 용접속도가 변화되어도 기지조직에 존재하는 미세기공을 제외 하며 내부균열의 발생정도가 다른 공정에 비해 거의 존재하지 않는다.

Fig. 4는 레이저 출력을 3kWatt 로 고정한 후 용접속도를 각각 변화시켜 용접한 후 용접부 단면형상을 나타냈다. 용접속도가 증가함에 따라 용입깊이와 폭의 변화율인 종횡비가 2.24에서 1.59로 감소하였다. 내부결함은 발생하지 않았지만, 용접속도가 60mm/sec이하로 감소할 때는 용접부의 표면비드가 용기 된다. 반대로 용접속도가 70mm/sec 이상으로 증가할 때는 용접부의 표면비드 끝단이 채워지지 않는 외부결함(언더컷: Under cut)이 발생하는 것을 볼 수 있다.

기존의 선행 연구에서는 탄소강을 용접했을 때 입열량 변화에 따른 내부결함을 고찰한 결과로서 특정범위와 외부에서 작용하는 변수(지그 압력변화)에 의해 고온균열과 내부기공이 나타나는 것을 알 수 있었다<sup>(10-11)</sup>. 그러므로 고밀도 에너지를 이용한 용융공정에서는 내부에 인입된 입열량을 균일함과 동시에 외부변수를 안정적으로 제어해야 된다.

본 연구에서는 레이저빔이 조사 된 후 레이저 공정변수에 따른 소재에 인입된 입열량을 고찰했다.

Fig. 4는 내부에 인입된 입열량을 산출하여 나타냈다. 그 결과 용접속도가 감소할수록 입열량과 용입깊이의 증가하였다. 이때 최대·최소 입열량은 각각  $35.38 \sim 5.7 \times 10^3 \text{J/cm}^2$  이다.

본 연구에서 얻고자 하는 공정변수는 용입깊이가 4~4.5 mm인 공정이다. 실험 결과를 보면 레이저 출력에 3kWatt 에서부터 각각 1kWatt 씩 상승할 때 용접속도가 30mm/sec 에서부터 각각 20mm/sec 씩 증가하였고, 용입깊이는 4.06~4.39 mm 이다. 이때의 레이저 빔에 의한 단위면적당 입열량은 각각 21.23, 16.98, 15.16  $\times 10^3 \text{J/cm}^2$  이다.

이와 같이 용입깊이가 비슷하지만 입열량이 다른 이유는 레이저빔과 재료와의 상호작용시간과 관련이 있다.

레이저의 에너지밀도에 관계없이 용접속도를 증가시키면 단위면적당 레이저빔과 시편이 서로 상호작용하는 시간이 감소하여 용입 깊이는 공통적으로 줄어들고 있다. 이것은 위에서 언급한 것처럼 레이저의 에너지밀도가 작으면 시편 표면에서 반사되는 양이 레이저출력이 클 때보다 많기 때문에 발생하는 현상이다.

이것은 심입용접을 위해 출력이 낮은 레이저를 이용해 용접속도를 느리게 하면 요구하는 심입용접이 가능하지만, 이럴 경우 입열량이 높아져 변형이 적은 정밀용접에는 좋지 않은 결과를 초래 할 수 있다. 따라서 입열량이 적으면서 정밀용접을 하기 위해서는 출력을 높게 하고 용접속도도 빠르게 하여 용접하는 것이 바람직함을 의미한다.

그러나 본 실험결과에서는 Fig. 3~5에서 보듯이 레이저 에

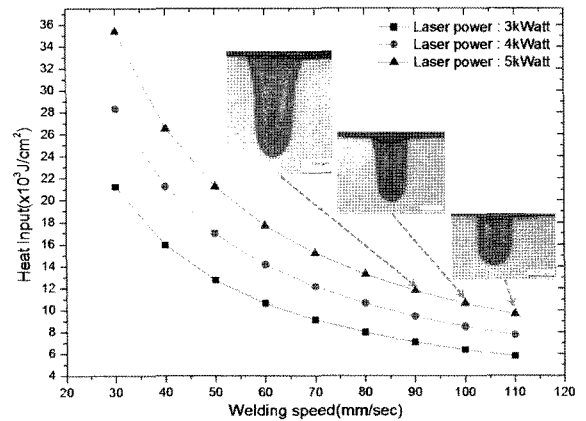


Fig. 5 Variation of heat input for laser powers and welding speeds

Laser power : 3kWatt, Focal position : 0mm, Shielding gas(Ar) : 10l/min					
Ws : 30mm/sec	Ws : 40mm/sec	Ws : 50mm/sec	Ws : 60mm/sec	Ws : 70mm/sec	Ws : 80mm/sec

Fig. 4 Cross sectional area of welding zone according to variation of welding speeds

너지밀도를 증가시키고, 용접속도를 빠르게 증가시키면 대부분의 공정에서 내부 기공과 고온균열이 발생하였다. 이것은 극저탄소강의 제조공정에서 나타나는 미세기공과 레이저 용접 시 기지내에 존재하고 있는 합금 원소들이 용융된 후 결정립이 재결정 및 성장이 안정적으로 이루어지지 않기 때문이다.

### 3.2 용접부의 미세조직특성

일반적으로 탄소강의 용융 용접은 온도와 시간의 함수 그리고 합금원소에 의해 다양한 미세조직이 발생하게 된다. 이러한 요소들은 용접부의 기계적 특성을 평가하는 기준이 되므로 용접 후 야금학적인 특성이 용접부에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

레이저 용접의 메커니즘은 레이저빔이 표면에 조사되면 고밀도 에너지의 다중흡수와 다중반사에 의해 키홀이 형성된다. 레이저빔이 조사되는 동안 키홀 내부에서 과열된 금속증기의 압력으로 용융금속을 표면 밖으로 밀어내고, 레이저빔이 옆으로 이동되면 용융금속의 중력, 점성 및 표면장력 등의 복합적인 작용의 영향을 키홀이 받으면서 용접부가 형성된다. 이와 함께 용접부의 미세조직은 급격한 온도변화에 의해 기지조직과 다른 급냉조직이 나타난다.

극저탄소강인 IF강은 탄소성분의 양이 매우 적어 성형가공성이 우수하므로, 주로 판재 형태로 제조되어 자동차의 딥드로잉(Deep drawing)용 소재에 많이 적용되고 있다. 이 소재는 야금학적 특성으로 미세조직의 입자크기 및 성장(Grain size and growth)과 관련이 깊다. 특히 앞서 언급했듯이 탄소나 질소와 결합하여 석출물을 형성하는 침입형 합금의 영향과 입열량의 변화에 대한 특성을 고찰하기 위해서는 용접부와 열영향

부의 결정격자가 중요한 변수이다.

Fig. 6~7은 비드온플레이트 용접조건에 따른 단위면적당 입열량과 미세조직의 변화 특성을 고찰한 결과이다. 이때 입열량은 각각  $21.23 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ ,  $7.96 \times 10^3 \text{J/cm}^2$  이다.

IF강의 금속학적 특성을 살펴보면, IF강은 불순물을 제거한 순수 Fe에 가깝도록 주조된 강재이다. IF강의 결정구조는 BCC이며 슬립계의 수가 구리(Cu)나 알루미늄(Al)과 같은 FCC 재료와 비교해 적기 때문에 미세조직의 진화가 상이하게 나타난다. 그 결과 Fig. 6~7과 같이 모재의 경우 등축(Polygonal) 페라이트 조직과 용접후 열영향부에서 페라이트 결정립계의 성장이 진행되어 오스테나이트와 페라이트 조직이 혼재된 상태이다.

Fig. 6은 입열량이 높은 공정으로 용접부의 A와 B부분은 중심부에서 모재부로 냉각하면서 발생한 조직성장특성이 나타나고 있다. 냉각이 시작하는 핵이 모재와 용접부의 경계부에서부터 발생하기 때문에 모재와 용접부 경계부의 조직이 미세하게 나타났다. C 부분에서 왼쪽 어두운 부분은 열영향부이고 오른쪽의 모재부는 IF강의 대표적인 미세한 등축 페라이트 조직이 나타나고 있다. 입자크기(Gain size)가 작은 경우는  $9 \mu\text{m}$  정도이고 가장 큰 입자는 그 크기가  $20 \mu\text{m}$  정도로 형성되었다. Fig. 7은 입열량이 작은 공정으로 극저탄소강이 모재방향으로 냉각되면서 Quasi-polygonal 페라이트, Granular bainitic 페라이트, Bainitic 페라이트 외에 Widmanstatten 페라이트, 침상(Acicular) 페라이트 등으로 혼재되어 나타나는 저온변태상이 나타나고 있다.<sup>4,5)</sup>

페라이트 결정립은 용융부에서 급격히 미세조직이  $200 \mu\text{m}$  이상으로 매우 조대해지는 변화가 발생한다. 이는 금속조직이

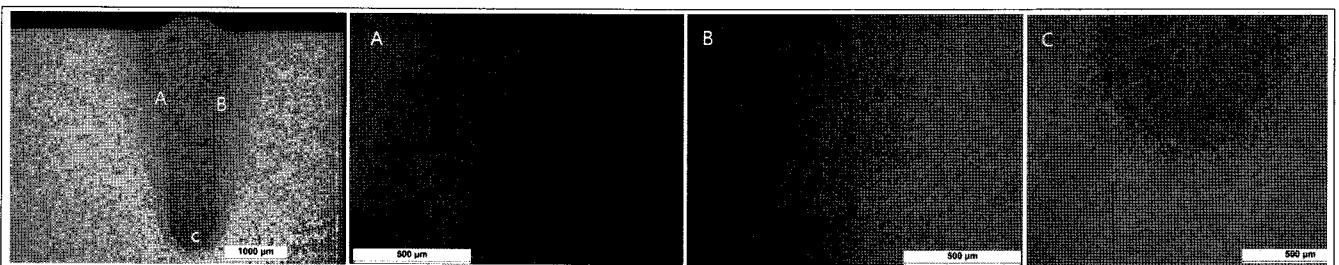


Fig. 6 Photographs of melting zone after bead on plate welding(Heat input :  $21.23 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ )

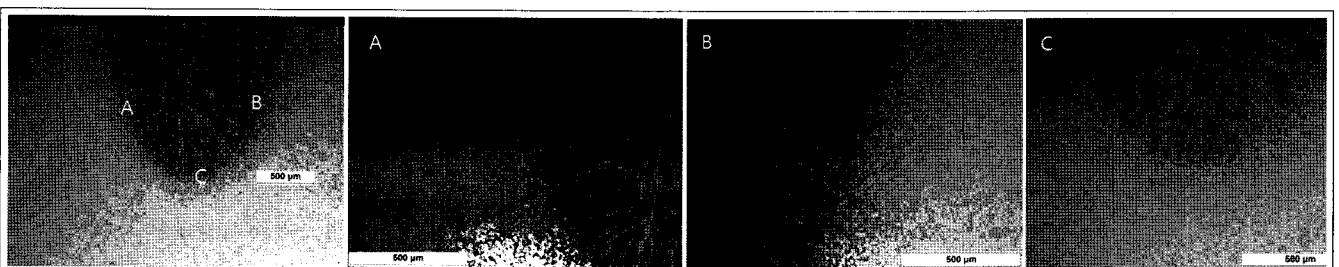


Fig. 7 Photographs of melting zone after bead on plate welding(Heat input :  $7.96 \times 10^3 \text{J/cm}^2$ )

레이저 빔에 의해 용융 후 AC<sub>1</sub> 변태온도 이상에서 망간(Mn)의 농도구배에 의한 망상의 경질 페라이트가 생성 되었다. 용융 후 냉각이 진행되는 방향으로 결정립이 조대화 됨을 알 수 있다.

용접부의 미세조직변화에 따른 경도분포를 분석하기 위해 마이크로 비커스 경도 측정을 하였다. 측정범위는 용접비드 상부에서 아래로 100 $\mu$ m 인 지점과 200 $\mu$ m 인 지점에서 25 $\mu$ m 간격이었다. 그 결과 IF강의 모재 경도는 170~180Hv 이며, 용접부의 중심부에서 최대 경도가 나타났다. 이때 마이크로 비커스 경도치는 430Hv 이다. 열영향부는 용접부를 중심으로 좌우로 약 50 $\mu$ m 이 형성되었다.

### 3.3 레이저빔과 전자빔 공정의 맞대기 용접

파이버 레이저빔에 의한 제품을 생산하고 있는 파워트레인 기어부품에 맞대기 용접을 실시하였으며, 용접조건은 비드 온플레이트 실험 결과에서 얻어진 공정을 사용했다. 그리고 전자빔 용접과 유사한 입열량과 용입깊이를 가지며, 내부결합이 없는 공정을 최적으로 판단했다. 이때 레이저 출력과 용접속도는 각각 3kWatt 와 30mm/sec 이었다.

Fig. 8은 파이버 레이저빔에 의해 맞대기 용접부를 각각의 구간별로 미세조직을 나타냈다. 그 결과 기어부품의 기하적인 형상과 맞대기 용접부의 체적의 차이에서 발생하는 열확산과 냉각속도의 변화로 인해 용접부의 끝단에서 미세조직이 다르게 형성됐다. 이것은 맞대기 용접시험편이 서로 다른 지지 조직을 가지고 있는 것을 의미한다. 그림에서 보듯이 왼쪽 금속의 미세조직의 결정립이 오른쪽에 있는 금속에 비해 조밀한 것을 볼 수 있다. 그리고 맞대기 용접부 끝단에서만 급냉조직이 관찰되었다. 이렇게 냉각속도가 빠른 부분은 열확산 폭이 좁지만 레이저빔이 조사될 때 작은 시편 전체가 열이 흡수되어 냉각이 상대적으로 느린 경우는 용융면적이 크게 형성 되었다. 또한 입계체적과 결정립의 크기가 다른 이중형상의 재료를 용

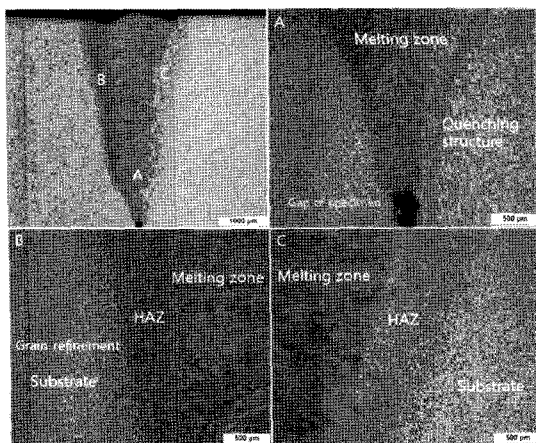


Fig. 8 Micrographs of melting zone with laser welding

접할 때 발생할 수 있는 현상으로 판단한다. Fig. 9는 이 현상의 모식도를 제적변화에 대한 열확산분포 및 레이저빔에 의한 키홀의 형성에 관해 나타냈다.

Fig. 8과 Fig. 9에서처럼 상대적으로 넓은 체적을 갖는 우측의 경우 용접부와 열영향부의 구분이 뚜렷하지 않다. 이는 지지내로의 열확산 속도가 빠르기 때문에 지지내로 빠르게 냉각이 진행되어 나타난 현상이다. 좌측의 경우는 용접되는 소재의 작은 체적으로 인해 소재가 레이저 빔에 의해 온도가 상승하여 재용고 될 때 주위로 냉각을 위한 충분한 열확산이 이루어 지지 않아 우측에 비해 자기냉각 시간(Self quenching time)이 상대적으로 길어지면서 조직이 성장하여 용접부와 열영향부의 구분이 매우 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 10은 파이버 레이저빔에 의한 최적의 용접부와 현장에서 사용되고 있는 전자빔 용접부를 비교한 결과이다. A는 전자빔에 의한 용접부이며, B는 파이버레이저빔에 의한 맞대기 용접부이다. 전자빔으로 용접된 용입깊이는 4.5mm 이며, 용접비드 종단에 약 0.5mm 크기의 기공이 관찰되었다.

Fig. 10에서 보듯이 레이저 용접의 경우 전자빔 용접에 비해 상부로 돌출된 용접 비드가 상대적으로 적었으며, 전자빔용접에서 발생된 기공이 관찰되지 않아 전자빔용접보다 양호한 용

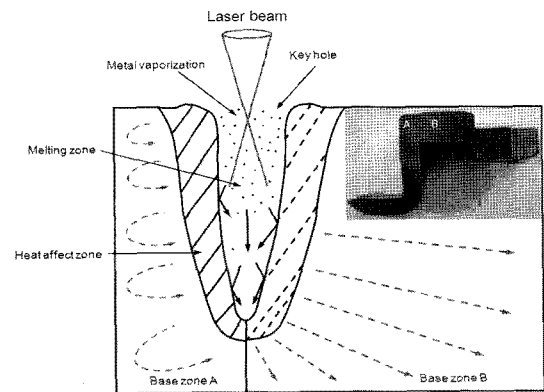


Fig. 9 Concept for key hole and cooling with laser welding

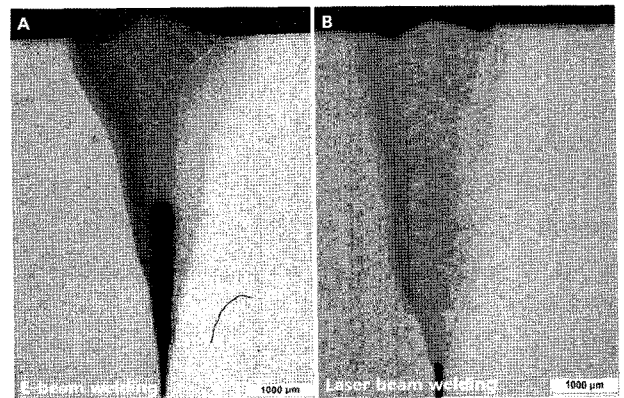


Fig. 10 Comparison of laser welding with E-beam weld

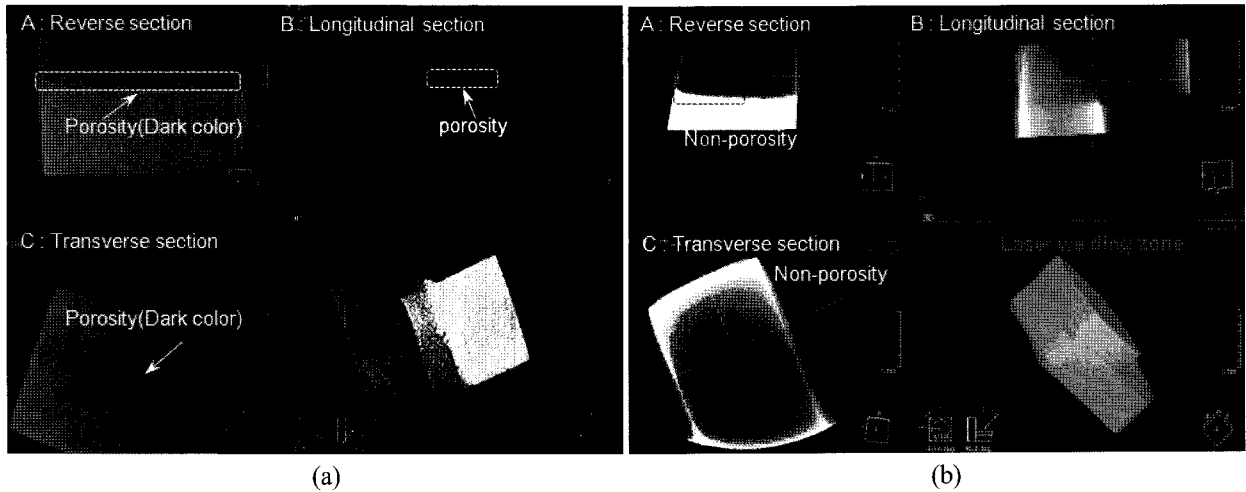


Fig. 11 Perspective of X-ray CT scan for melting zone after E-beam and laser welding of gear part

접결과를 나타내고 있다. 그러나 두 용접부 모두 기어 용접부 재료의 이종 형상 특성으로 인해 용접 후 소재의 좌우 자기닝 각시간이 서로 다르게 되어 용접부 단면 좌측과 우측의 열영향부의 크기가 서로 다르게 나타났다.

Fig. 11은 용접부의 기공 및 내부균열의 유무를 관찰하기 위해 비파괴 검사 기법인 3차원 X-ray CT(Model: QRIX-TVX-IMT 160CT)을 이용해 용접부의 단층촬영을 진행했다. 이때 용접부 횡단면을 500 $\mu$ m 간격으로 단층을 촬영했다.

Fig. 11은 전자빔 용접부와 레이저 용접부의 단면비드를 중심으로 아랫방향, 종방향 및 횡방향으로 단층 촬영한 사진이다.

Fig. 11(a)의 전자빔 용접 샘플의 X-ray CT 촬영 결과를 보면, A는 용접부 하단에서 촬영된 사진으로 검은색으로 나타난 부분은 용접부에서 생성된 기공이 관찰되었다. B는 용접된 기어부의 용접비드를 용접 진행방향(횡방향)으로 단층 촬영한 사진이다. 얼룩처럼 불규칙하게 횡방향으로 형성된 것은 용접부에 형성된 기공의 형상을 나타낸다. 그러나 레이저 용접부를 촬영한 Fig. 12(b)에서는 기공과 같은 용접부 결함이 발생하지 않아 검은색의 형상은 확인 할 수 없었다.

이상의 관찰로부터 레이저용접이 전자빔 용접보다 입열량을 적절히 조절하면 내부 결함이 없는 양호한 용접이 가능함을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

자동차용 기어재인 극저탄소강(IF강)을 파이버 레이저로 공정 변수를 변화시키면서 용접한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기존의 전자빔 용접의 경우 관통용접을 실시하지 않고 약 4~4.5mm 두께로 용접했기 때문에 레이저 용접시 최적 입열량 조건은 레이저 출력과 용접속도를 각각 3kWatt,

30mm/sec 일 때 안정된 용접결과를 얻었다. 이때 입열량은  $21.23 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$  이었다.

- (2) 기어부품 용접부는 용융 중심선을 기준으로 좌우대칭적으로 미세조직이 다르게 형성되었다. 이러한 현상은 임계 체적과 결정립의 크기가 다르기 때문에 레이저빔에 의해 인입된 열에너지가 모재에 전달된 후 열확산속도 또는 냉각속도의 가속에 의해 열영향부에서 급냉조직이 나타났다.
- (3) 파워트레인 부품 중 기어부품의 레이저 용접을 적용하여 기존의 전자빔 용접 방식에 비해 레이저 용접이 내부결함이 없이 안정적인 용접부를 확인하였으며, 레이저 용접이 기존의 전자빔 용접이 가지지 못한 생산성 및 용접품질 향상 등 많은 장점을 가진다.

#### 후 기

이 논문은 2010년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구 되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kim, S. J., and Chin, K. G., 2007, "Developments and Applications of High Strength Cold Rolled Steel Sheets for Automobiles," *The 5th rolled steel symposium, KSTP*, pp. 45~52.
- (2) Lee, H. B., Chang, I. S., Jung, C. H., and Kim, K. S., 2003, "Development of Laser Brazing in Car Body," *2003 Proceedings of the Korean Society of Laser Processing Conference*, pp. 9~13.
- (3) Suh, J., Lee, J. H., Kang, H. S., Park, K. T., Kim, J. S., Lee, M. Y., and Jung, B. H., 2006, "Optimal

- Processing and System Manufacturing of a Laser Welded Tube for an Automobile Bumper Beam,” *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 209~213.
- (4) Jeong, W. C., and Cho, K. M., 1999, “Effect of Mn on the Microstructure and Mechanical Properties of High-Strength IF Steels for Automotive Body Panel,” *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 37, No. 6, pp. 672~679.
- (5) Jeong, W. C., 2004, “Effect of Alloy Additions and Annealing Parameters on Micro structure in Cold-Rolled Ultra Low Carbon Steels,” *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, Vol. 17, No. 2, pp. 78~86.
- (6) Lee, H. B., Jung, D. H., Oh, G. M., and Cha, C. H., 2003, “Comparison of Electron Beam and Laser Welding Characteristics for Transmission Speed Gear,” *2003 Proceedings of the Korean Society of Laser Processing Conference*, pp. 43~47.
- (7) Oh, Y. S., Yoo, Y. T., and Shin, H. J., 2009, “A Study on T-joint Welding by High Power Fiber Laser of SAPH Steel Plate for Automobile,” *Transactions of KSAE*, Vol. 17, No. 3, pp. 35~44.
- (8) Wedel, and Bjorn, 2006, “Laser Processing Heads for Fiber lasers Recent Developments for 10kW Laser Power and Diffraction Limited Beam Quality,” *2nd International workshop on Fiber laser*, pp. 15~17
- (9) Quan, Y. J., Chen, Z. H., Gong, X. S., and Yu, Z. H., 2008, “Effects of Heat Input on Microstructure and Tensile Properties of Laser Welded Magnesium Alloy AZ31,” *Materials characterization*, Vol. 59, pp. 1491~1497.
- (10) Yoo, Y. T., Kim, J. Y., Ro, K. B., Yang, D. J., Oh, Y. S., Im, K. G and Kim, J. H., 2003, “Estimation of Laser Welding Behavior of SM45C Steels by Plume Monitoring,” *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineer*, Vol. 12, No. 1, pp. 14~21
- (11) Yoo, Y. T., Oh, Y. S., Ro, K. B., Im, K. G., 2003, “Comparison of Welding Characteristics of Austenitic 304 Stainless Steel and SM45C Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser,” *Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 58~67.