

연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 금형강의 보수용접 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Repair Welding for Mold Steel using Continuous Wave Nd:YAG Laser

유영태¹, 신호준^{2,✉}

Young Tae Yoo¹ and Ho Jun Shin^{2,✉}

¹ 조선대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chosun Univ.)

² 조선대학교 레이저가공연구실 (Laser Manufacturing Laboratory, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: sbn66@hanmail.net, Tel: 062-230-7942

Manuscript received: 2009.11.13 / Revised: 2010.6.30 / Accepted: 2010.8.5

In this study, wire was used as the filler material for the laser repair welding, and the phenomenon in which the supplied filler material was melted and beaded down into the specimen was examined with varying laser powers and welding speeds. The optimal processing condition was found to be the laser power of 1,300 W, the welding speed and feed wire supply speed of 0.5 m/min and the defocused distances of +2mm. At this time, the heat input(E) was 65 ~ 75 J/mm², and no internal defect occurred. When repair welding was carried out as the optimal processing for the part that had an external defect with the radius of 2mm, the filler metal was melted, resulting in the volume smaller than the defect part and thus causing the part unfilled. Therefore, it was found to be necessary to carry out repair welding two to three times by multiple passes rather than does it only once by single pass.

Key Words: Repair Welding (보수용접), Nd:YAG Laser (Nd:YAG 레이저), Feed Wire Metal (피드와이어금속), Heat Input (입열량), Micro Structure (미세조직), Hardness (경도)

1. 서론

최근 산업사회가 급격히 발전함에 따라 자동차, 가전, 전자와 중공업 산업들이 고도로 발전하고 있다. 이렇게 고도화된 생산설비나 생산품들은 제작과정이나 사용 중 과부하 또는 반복 및 피로하중과 같은 외적 요인으로 결함이나 손상이 발생할 수 있다. 그러므로 원활한 작동을 위해 결함이 발생한 장비나 설비의 일부를 교체 하거나 전체를 교체하여 문제를 해결할 수도 있다.

하지만 교체하는 방법으로 문제를 해결하면 생산단가 인상요인으로 작용하여 생산성 향상에 걸

림들로 작용한다.

산업현장에서 생산성 향상측면을 고려했을 때 금형 제작의 경우 교체보다는 손상된 일부분을 보수하여 재사용하는 방법을 선호하고 있다. 이렇게 금형을 보수하는 방법은 재설계에 의한 시간손실 대응과 재료비절감, 생산품의 납기단축 등 많은 장점을 가지고 있다.

금형산업에서는 결함부분을 보수하는 방법으로 다양한 용접방법을 사용하며, 일반적으로 아크 보수용접, 가스 보수용접 등이 있다. 그러나 이런 용접방법들은 용접 후 용접열로 인한 모재의 변형과 함께 용접부에 잔류응력이 남아 최종 제품에 악영

향을 미칠 수도 있다.

이러한 기존 용접방법으로 보수용접 했을 경우 발생하는 다양한 문제점을 해결하기 위해 레이저 용접방법을 연구하는 사례가 증가하고 있다.^{1,4} 레이저 보수용접은 에너지밀도가 높은 레이저빔을 작은 초점면적으로 집속(focusing)시켜 재료표면에 조사하는 방법이다. 또한 모재에 침투된 에너지는 급가열과 급냉각 시키는 방법을 부품형상 변형을 최소로 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러므로 금형 제작 시 일반적인 보수용접으로 접근하기 어려운 모서리부분이나 가공부위의 직경에 비해 깊이가 깊은 부분을 효과적인 보수용접이 가능하다.

레이저 보수용접에 대한 선행 연구는 다음과 같다. Vedani^{5,6}는 표면 처리된 공구강에 보수용접을 할 때의 문제점과 일반 공구강의 보수용접시 미세구조의 특성을 연구 하였고, Capello⁷는 파우더를 이용한 공구강의 보수, Oldani⁸는 Tantalum의 보수용접을 연구하였다. 대부분의 연구자들은 공구강을 중심으로 연구를 집중하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 플라스틱 성형용 금형강인 KP-4M의 레이저보수용접에 대한 최적의 공정변수 특성을 분석하고자 한다.

산업현장에서 요구되는 금형 소재의 특성은 각각 다음과 같다. 커플링(coupling) 등에 사용되는 PVC에는 내식성이, 자동차나 가전제품 등에는 피삭성이 요구되지만 근래엔 전반적으로 피삭성과 내마멸성이 동시에 요구되고 있다. 따라서 기존의 플라스틱 성형강인 SM재와 SCM재 등으로서는 이러한 요구특성을 충분히 만족할 수 없기 때문에 근래에 개발된 플라스틱 금형강인 KP-4M이 널리 쓰이고 있다. 시험편으로 사용된 KP-4M은 진공탈가스 처리된 강피로 단조해서 재질의 청정도가 높고 기공과 성분의 편석이 없으며 내부 응력이 제거되어 금형가공 때 일어나는 변형이 적다는 특성을 가지고 있다.^{9,10}

본 연구목표는 플라스틱 성형용 금형강인 KP-4M의 미소균열이나 마모가 발생하였을 경우의 보수용접에 대한 최적의 공정을 연구하는 것이다. 보수용접의 최적공정변수를 결정할 때 사용하는 용가재(Filler Metal)로는 AWS 규격으로 크롬-몰리브덴강용 와이어 ER80S-G를 사용하였다.

용가재의 공급속도와 레이저빔의 이송속도를 일정하게 유지시킨 후 레이저빔 출력을 변화시켜

실험하였다. 이때 모재와 보수용접층의 기하학적 단면과 내부결합 등을 관찰하여 최적의 공정조건을 결정하였다. 이때 보수용접부의 기하학적인 단면 형상비를 고찰하였고, 모재와 경도시험을 통해 최적 공정조건을 제시한 후 가상의 외부결합이 발생된 부위를 보수용접조건을 적용하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험에 사용된 레이저는 1.06 μm의 파장을 가지는 연속파형 Nd:YAG로서 평균 유효 출력이 2 kW인 연속파형(CW : continuous wave)이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 F=200 mm이며, 렌즈의 직경 D=60 mm인 F#(F number F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 본 연구에 실험장치의 구성도는 Fig. 1에 나타냈다. 레이저빔과 용가재(피드 와이어)는 정밀하게 제어하는 게 중요한 변수이다. 실험에 사용된 CNC 공작대는 겐트리 타입(LASMA 1054)으로 레이저용접 헤드를 부착하는 방식이다. LASMA의 각축의 위치정밀도는 각각 5, 5, 1 μm이며, 반복정밀도는 8 μm이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 피드와이어 공급 장치인 와이어건은 지그를 제작하여 임의로 각도를 조절할 수 있도록 하였다. 레이저 보수용접은 피드 와이어 건(KD7000)을 용접헤드에 부착시켜 레이저빔과 용가재가 동시에 이동하도록 실험장치를 구성하였다. 피드와이어의 일정한 공급각도는 45°이며, 와이어건에 부착된 각도조절 장치를 이용하여 고정시킨 후 실험하였다.

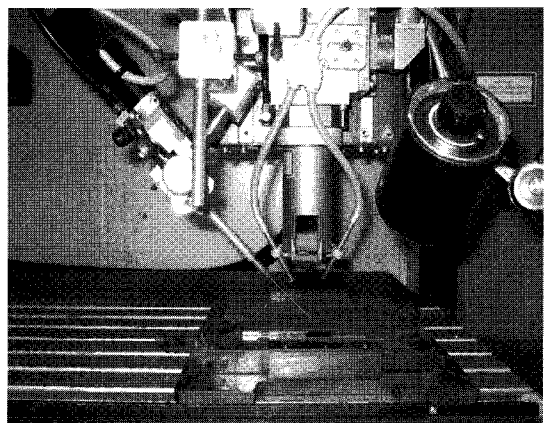


Fig. 1 Experimental set-up for laser repair welding

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

KP-4M	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe
	0.38	0.22	0.87	1.66	0.4	Included	Bal.
Feed wire	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S
	0.035	0.57	1.10	1.23	0.51	0.01	0.013

2.2 실험방법

실험에 사용된 시편은 플라스틱 성형용 금형강인 KP-4M 을 사용하였다. 시편편의 크기는 100 mm(L) × 100 mm(W) × 10 mm(T)이고, 표면은 밀링 후 성형연마 공정을 통해 표면 가공하였다. 보수 용접 전 시편편의 표면은 이물질 제거하기 위해 아세톤으로 세척하였다.

실험에 사용된 용가재는 플라스틱 성형용 금형강인 KP-4M 의 보수용접 참고자료에서 언급한 AWS 규격 크롬-몰리브덴강용 와이어[ER80S-G]로서 직경이 $\phi 1.0$ mm 을 선정하였다.

보수용접 전 예비실험으로 피드와이어를 공급 시킬 때 레이저빔에 의해 모재(Base metal)를 용융시킨 열로 용가재를 용융시키는 방법(Fig. 2(a))와 레이저빔에 의해 용가재(와이어)를 용융시켜 모재에 용착시키는 방법(Fig. 2(b)), 레이저빔과 와이어를 동시에 공급하여 모재에 용착시키는 방법(Fig. 2(c)) 등을 비교실험 하였다. 예비실험의 레이저 출력은 1,000 W 이고, 용가재 공급 속도 및 용접속도

는 동일조건인 1 m/min 로 실험을 진행했다.

그 결과 Fig. 2 에서 (b)방법은 비드면이 깊어지는 현상이 발생하고 비드면도 모재와 충분히 결합하지 못하는 현상을 볼 수 있었다. 반면 레이저빔과 용가재에 동시에 조사하는 방법인 (c) 과정은 가장 비드면이 고르고 용입 깊이도 깊게 형성되었다. (a)는 와이어가 충분히 용융되지 않고 모재와의 결합도 거의 이루어지지 않는 비드면이 형성되었다.

이러한 현상은 John¹² 은 와이어직경과 레이저빔의 크기를 동일하게 유지한 후 와이어의 중심축과 레이저빔의 중심부를 정밀하게 유지하는 것이 매우 중요한 변수로 언급하였다. 그러므로 본 실험에서는 레이저빔과 용가재를 동시에 조사(irradiated)하는 방법을 선택하였고, Fig. 2 에서처럼 레이저빔이 이동하는 전면에서 용가재를 공급했다. 단, 용가재의 공급시간은 레이저빔이 조사된 후 약 0.1 sec 의 지연시간을 주었다.

그리고 보수용접 후 용가재가 용융되어 시편

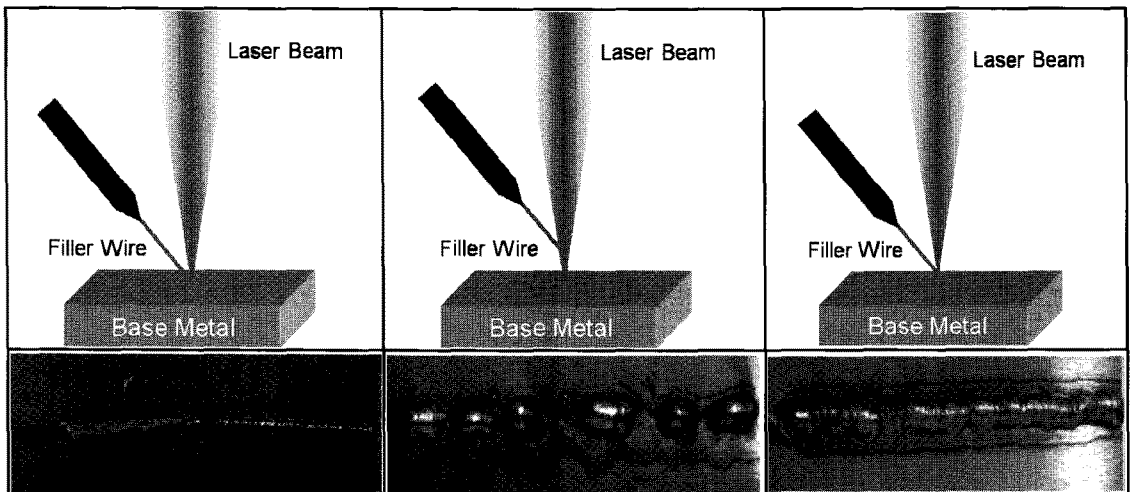


Fig. 2 Schematic illustration showing the wire feed and laser beam arrangement ; (a) wire supply after melting of base metal, (b) repair welding after melting of wire and (c) at once repair welding with wire and base metal

표면에 부착된 높이를 약 2.0 mm 로 만들기 위해 와이어의 공급위치는 시험편 표면으로부터 약 2 mm 로 유지시킨 후 실험을 진행했다. 본 예비실험 결과에 따르면 용가재의 공급위치를 2 mm 이하(0, 1 mm)로 유지시켰을 때 시험편에 공급되는 용가재가 보수용접 후 용융체적이 증가된 육성층과 서로 부딪히는 현상이 나타났다. 그러므로 와이어의 공급위치는 시험편 표면으로부터 약 +2 mm 로 유지하였다. 이때 레이저빔의 비초점거리는 +2 mm (focal length: 200 mm)이다. 추후 본 실험은 예비실험을 통해 얻어진 자료를 토대로 용접속도(V_w)와 용가재 공급속도(V_f)를 동일하게 유지시킨 후 레이저빔 출력을 변화시켰다.

레이저빔의 출력은 800W 에서 1,500W 까지 100W 씩 증가시키면서, 레이저빔과 용가재를 시험편에 조사시켰다. 이때 용접속도(V_w)와 용가재 공급속도(V_f)는 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m/min 으로 변화시켜 실험을 진행했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용가재와 레이저빔의 용융특성

레이저 보수용접 후 용융특성은 각각의 공정변수를 변화시켜 실험을 진행했을 때 용가재가 모재에 용입된 형상 및 기하학적인 보수용접부에 대해 고찰했다. 실험결과를 정량적으로 분석하기 위해

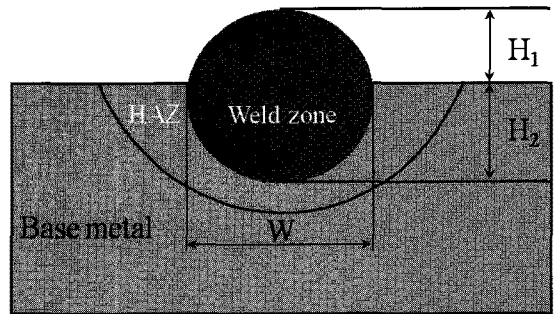


Fig. 3 Principal repair clad dimensions in cross section

본 연구에서는 Fig. 3 과 같은 형상학적인 특성에 대한 고찰을 진행했다. 여기서 H_1 은 용가재가 용융되어 시편 표면에 부착된 높이이다. H_2 는 용가재가 용융되어 모재에 용입된 깊이를 나타내고, W 는 용융 폭이다. 그리고 용가재와 모재의 용융 때문에 발생한 외부원은 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone)를 나타내고 있다.

상부 비드면 높이와 용입 깊이(Penetration depth)의 비은 H_2/H_1 로 표현하였고, 용융깊이에 대한 용융폭의 비는 각각 W/H_1 와 W/H_2 로 설정한 후 형상학적인 분석에 대해 연구했다.

먼저 고려할 사항은 H_2/H_1 비(ratio)로서 이 값이 작으면 용가재가 충분히 용융되어 모재에 침투되지 못하기 때문에 용융된 용가재가 모재로부터 쉽게 분리될 수 있다. 또한 H_2/H_1 가 1.5 보다 크면

Feed wire supply speed (V_f)& Welding speed (V_w) : m/min, z=+2mm				
Laser power (Watt)	0.5	1.0	1.5	2.0
1000	[Image]	[Image]	[Image]	-
1100	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1200	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1300	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1400	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]
1500	[Image]	[Image]	[Image]	[Image]

Fig. 4 Surface bead shape with laser repair welding

Table 2 Aspect ratio after laser repair welding

Bad ■, Good ▲, Very good ●

Laser power (Watt)	Feed wire supply speed (V_f) & Welding speed (V_w) : m/min, $z=+2\text{mm}$							
	0.5		1.0		1.5		2.0	
1000	0.4449	■	0.2080	■	0.1222	■	-	
1100	0.2061	■	0.4044	■	0.4008	■	0.3156	■
1200	0.6274	▲	0.4985	■	0.5709	■	0.8148	▲
1300	1.1444	●	0.9898	●	0.7778	▲	0.8080	▲
1400	1.4777	▲	0.8601	▲	1.5396	▲	1.6262	▲
1500	1.4891	▲	1.2478	▲	0.9017	●	1.3786	▲

용융된 용가재가 모재에 지나치게 용입되어 모재에 취성이 발생하거나 열전달에 의한 변형 영역이 증가될 수 있다. 두 번째로 W/H_1 의 비가 1보다 크면 레이저빔에 의한 열전달 때문에 HAZ 영역이 증가함을 의미한다. W/H_2 는 용가재가 모재에 용융되어 수평방향으로 확산되는 정도를 나타낸다. 본 연구에서 플라스틱 성형용 금형강의 보수용접에서 가장 적합한 조건은 $H_2/H_1 \approx 1$ 인 공정을 최적의 공정조건으로 결정하였다.

$H_2/H_1 \approx 1$ 일 경우 용가재가 모재에 용입되어 가장 용착력이 강하고, W/H_1 은 1보다 작을 때 열영향부는 상대적으로 작을 것으로 판단하였다.

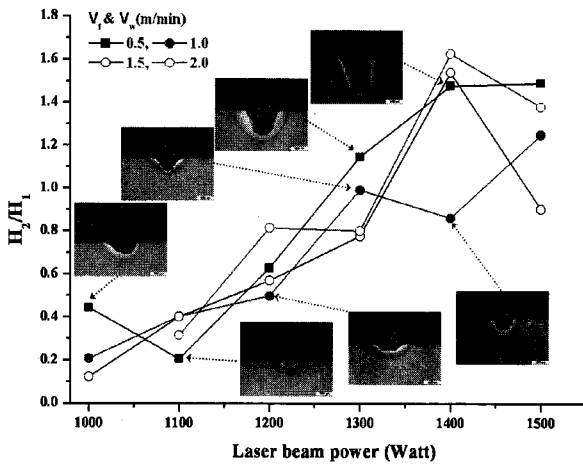
Fig. 4는 용접속도(V_w)와 피드와이어 공급속도(V_f)를 동일한 공정으로 실험하였다. 이때 공정조건은 0.5 m/min에서 2.0 m/min까지 0.5 m/min씩 증가시켰고, 레이저빔의 출력을 증가함에 따른 표면비드 형상을 나타낸 결과이다. 레이저빔의 출력이 800 W일 때는 레이저빔의 이송속도가 0.5 m/min으로 저속일지라도 일정한 보수용접층을 형성시키지 못하였고, H_2/H_1 의 값이 0.0589로 매우 낮았다. H_2/H_1 이 이처럼 작은 것은 용가재가 시험편 표면에 부착된 육성층의 표면장력이 모재와의 계면접촉력보다 크게 작용하여 용착되기 때문이다.

보수용접부의 H_2/H_1 의 값이 1에 가까운 값을

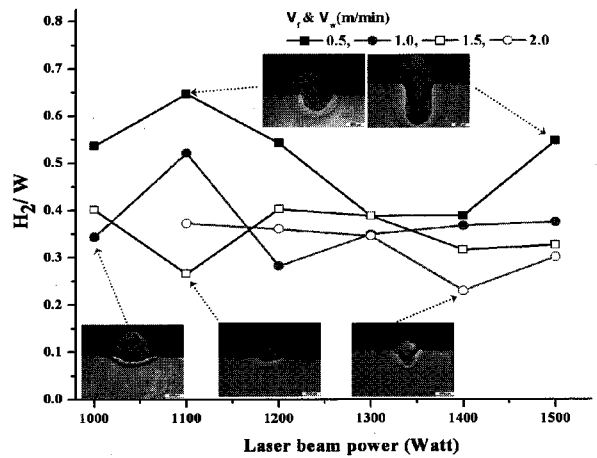
나타내는 공정조건은 레이저 출력이 1,300 W일 때 용접속도가 각각 0.5 m/min과 1.0 m/min이고, 레이저 출력이 1,500 W일 때 1.5 m/min의 용접속도를 가졌다.

Table 2와 같이 1,000 W일 때는 H_2/H_1 값이 평균적으로 0.5 이하로 형성된 것을 볼 수 있다. 이것은 입열량이 충분치 않아 와이어가 모재로 충분히 침투하지 못해 모재 표면에 놓여 있는 형상이 나타난다. 1,100 W~1,200 W의 경우도 일정치는 않지만 H_2/H_1 값이 평균적으로 1에 미치지 못해 와이어의 침투 깊이가 충분치 않아 불안한 형상을 보인다. 반면 1,300 W~1,500 W의 경우 어느 정도 오차가 있지만 대부분 1에 가까운 값이 나오는 것을 알 수 있다. 이는 와이어의 침투 깊이가 충분히 깊어 모재와의 결합이 좋아 안정감있는 형상을 보인다. 특히 레이저 출력과 용접속도가 각각 1,300 W, 1.0 m/min의 공정에서는 시험편들 중 1에 가장 근접한 값이 되었다.

Fig. 5(a)는 레이저 출력에 따른 비드면 높이와 용입 깊이의 비를 고찰한 결과이고, Fig. 5(b)는 레이저 출력에 따른 종횡비를 나타냈다. Fig. 5(a)에서는 레이저 출력이 증가함에 따라 H_2/H_1 값이 증가하였다. 이러한 현상은 레이저빔의 에너지가 높아져 시험편에 형성되는 키홀의 폭과 깊이 비가 증가함에 따라 비드면 높이가 낮아지고 용가재의 침투



(a)



(b)

Fig. 5 Technological monogram according to laser powers ; (a) clad depth inside the material base/clad height above the work -piece surface and (b) clad depth inside the material base/clad width

깊이가 증가하므로써 H_2/H_1 값이 상승하는 것이다. 반면 레이저 출력이 작을 때는 입열량이 충분치 않아 용가재가 모재로 충분히 침투하지 못해 비드면 높이는 높으나 침투깊이가 미비해 H_2/H_1 값이 0.5 미만으로 작은 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와는 다르게 출력이 증가함에 따라 값이 감소하는 경향을 보인다. 이것은 레이저 출력이 낮아짐에 따라 입열량도 충분하지 않으므로 비드면의 높이가 높고 용융 폭은 작아져 1에 가깝게 나오는 것을 알 수 있었다. 반면 레이저빔이 고출력으로 증가하면 입열량이 충분하기 때문에 비드면 높이는 낮아지고 용융 폭은 넓어져 중형비 값이 낮아지는 것을 알 수 있었다.

3.2 레이저 공정변수에 따른 금형강의 보수 용접성 평가

레이저 보수용접성 평가를 고찰하기 위해 각각의 공정변수에 대해 용융단면을 분석하였다. 이와 함께 최적 공정변수는 H_2/H_1 (상부 비드면의 높이/용입깊이)와 입열량을 계산하여 용융특성과 비교해 선정했다.

$$E = \frac{P}{W \cdot V} \quad (J/mm^2) \quad (1)$$

여기서 P는 레이저 출력, W은 용융폭, V은 용접 속도이다.

Fig. 6은 레이저 보수용접 후 공정변수에 따른 육성된 용접부의 횡단면의 형상을 나타냈다.

용접속도와 용가재(와이어) 공급속도가 0.5 m/min으로 일정할 때 에너지밀도가 작은 출력범위인 800 W ~ 1,000 W에서는 와이어가 모재에 충분히 용입되지 못해 모재 표면에 얹혀 있는 형상을 나타냈다. 그러나 에너지밀도가 증가했을 때 즉, 레이저빔 출력이 1,100 W ~ 1,200 W 사이에서는 비드면의 높이는 높지만 침투 깊이가 작아 불안정하고 모재와의 용착력이 좋지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 와이어 침투부 끝단에서 표면과 내부의 불순물이 기화된 기포가 증발하지 못하고 포획되어 기공이 형성되는 것을 볼 수 있다. 반면 1,300 W ~ 1,500 W 범위는 보수용접부의 침투된 깊이가 상부에 형성된 육성비드의 높이의 비가 일정하고 안정적임을 알 수 있고, 모재와의 용착력이 좋음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 최적 공정변수를 선별하기 위해 레이저 출력과 용접속도에 따른 입열량 분포를 나타냈다. 또한 보수용접부의 용융특성과 형상학적인 특성을 비교하기 위해 상부 비드면 높이와 용입 깊이(Bead depth)의 비(H_2/H_1)와 함께 나타냈다.

앞선 실험 결과 형상학적 특성을 고려할 경우 최적의 공정변수가 결정하는 기준이 $H_2/H_1 \approx 1$ 로서 입열량 분포를 고찰했을 때 그 범위는 75 ~ 65 J/mm^2 이다.

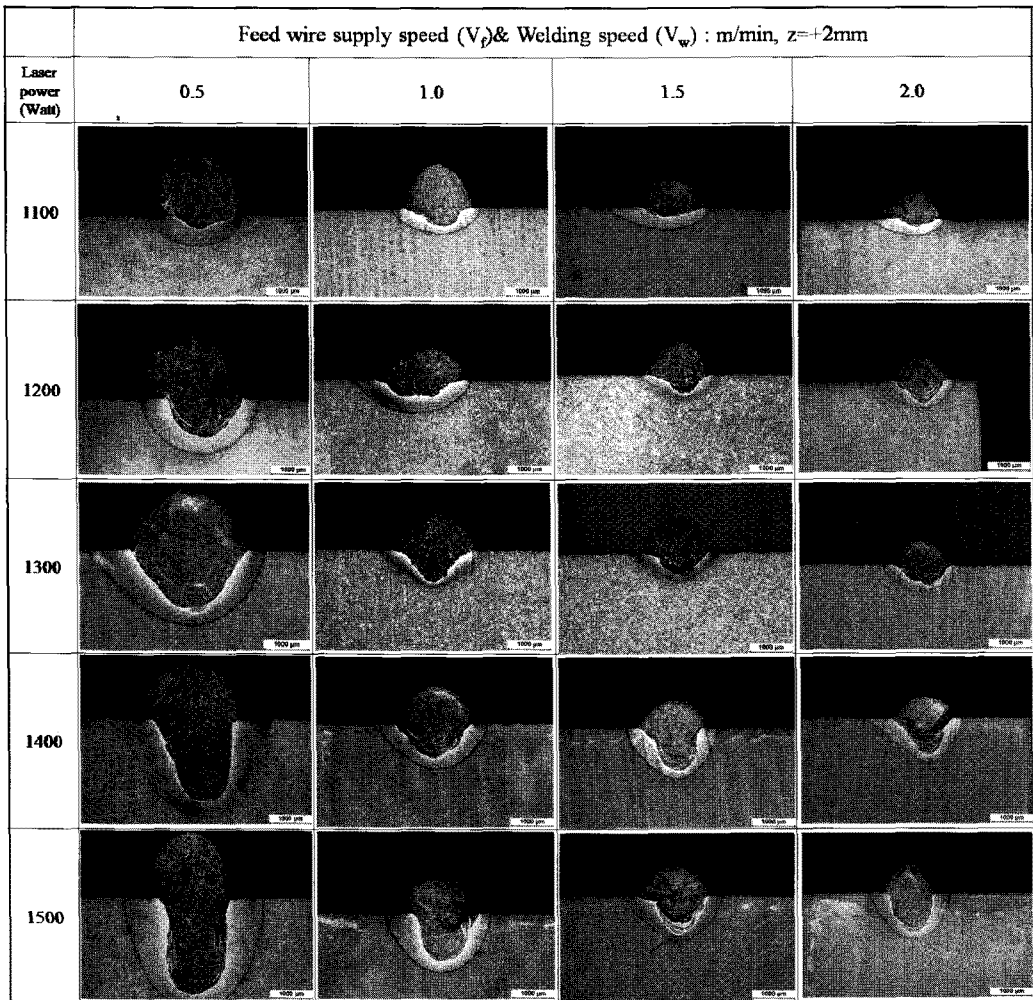


Fig. 6 Cross section of weld zone after laser repair welding

Fig. 7 에서 $H_2/H_1 \approx 1$ 에 근접한 공정은 용접속도가 0.5 m/min 일 때 레이저 출력이 1,300 W 였다. 이때 입열량은 약 $68 J/mm^2$ 이었다.

Fig. 8 은 보수용접부의 기계적 성질에 대한 분석을 위해 용접부와 모재사이의 경도 분포를 측정한 결과이다. 이때 레이저 출력과 용접속도는 각각 1,300 W, 1.0 m/min 이다.

경도측정 위치는 비드부 중심에서 모재 표면으로부터 200 μm 지점 밑으로 100 μm 간격으로 측정 한 것으로 그래프에서는 3 회 측정 후 평균 경도 값을 나타냈다.

그 결과로서 모재 지점의 경도 값은 약 HV = 255 이었고, 열 영향부의 경도값은 대략 HV = 600 ~ 650 정도로 경도값이 증가 했다. 시험편 표면에

형성된 옥성층의 경도값은 평균적으로 HV = 450 ~ 500 사이로 모재의 열 영향부보다 경도값이 낮은 것을 알 수 있었다. 레이저 출력이 높아지면 열 영향부가 넓어지고 경도값도 조금씩 높아지는 것을 알 수 있었다. 입열량을 변화시켜 용융부의 면적이 변화될 때 용융단면과 모재와의 경계부위인 HAZ 의 영역이 달라졌다. 이와 함께 HAZ 는 모재와 용융부의 급격한 온도구배 때문에 모재와 용융부에 비해 큰 경도값을 가지는 것으로 판단된다. 이러한 경도값은 레이저 표면열처리에 얻어진 결과값과 동일했다.

Fig. 9 는 레이저 보수용접을 2 회 진행한 후 보수용접층의 횡단면의 미세조직을 나타냈다. 이 공정은 레이저 출력 및 용접속도&와이어 공급속도,

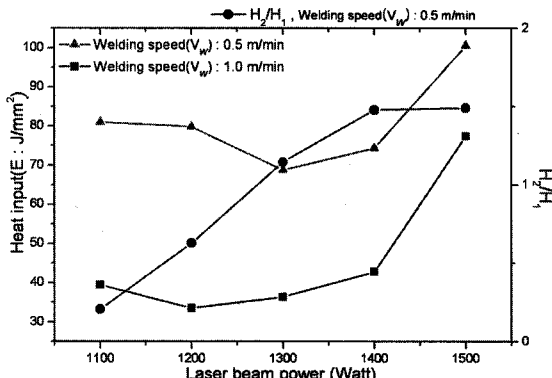


Fig. 7 Variation of heat input according to laser beam power

초점 및 비초점거리는 각각 1,300 W, 0.5 m/min, +2 mm 이다.

레이저 보수용접층은 용접부의 전형적인 조직 상태인 모재와 용접부의 경계면사이에 나타나는 미세조직변화를 보여주고 있다.

Fig. 9의 A 구역은 용융부로서 레이저빔이 모재를 용융될 때 와이어를 혼재시킨 후 형성된 것이며, 용접중심선을 기준으로 미용해 탄화물과 마르텐사이트가 나타났다.

B 는 모재와 용융부의 경계면이며 급격한 온도 구배차이에 의해 입자성장(grain growth)과 재결정(recrystallization)이 나타난 것을 볼 수있다. 그러므로 냉각시간의 상대적 지연현상 때문에 조밀한 침상 마르텐사이트가 아니라 래스(lath) 마르텐사이트와 미용해 탄화물이 혼합된 조직으로 변태되었다. 이러한 현상은 모재를 표면경화처리했을 때 나타나는 변태조직과 유사하다. 대개 레이저 표면경화 방법에서 단점은 레이저빔이 연속적으로 겹쳐지는 부분이 있으면 백 템퍼링(Back tempering)현상이 발생하여 경도 저하를 일으키게 된다.¹¹ 이와 같은 현상은 레이저빔이 모재를 용융시킬 때 고밀도의 에너지를 조사시켜 키흔 현상을 일으키게 되는데, 이때 용가재는 키흔의 형성을 방해하게 되고 균일한 용접경계면을 형성하지 못하게 된다.

그러므로 이 현상은 용접부와 모재의 경계부분에서 볼 수 있고, 백 템퍼링 현상처럼 경도값이 저하 된 것으로 판단된다. 이 때 경도값은 약 600 Hv 정도이다.

C 은 결정입자가 매우 조밀한 마르텐사이트조직으로 변태되었으며, 경도값은 약 650 ~ 700 Hv 을

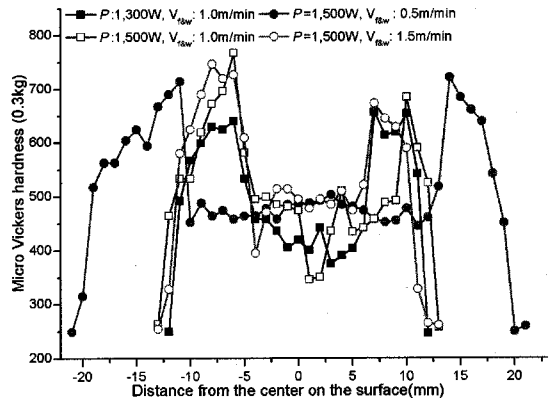


Fig. 8 Comparison of micro Vickers hardness for repair welding zone with welding parameters

가진다. 그러나 이와 같이 경도값이 크게 나타나면 국부취성이 나타나게 되어 내피로성과 내충격성에 취약하다. 그러므로 이러한 현상을 제거해주는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. 추후 연구에서는 이런 단점을 보완하기 위해 레이저 표면경화 열처리 방법을 이용해 보수용접부의 안정적인 조직을 확보하기 위한 연구를 진행할 계획이다.

앞선 연구결과를 토대로 레이저 보수용접성에 관한 평가 및 최적 공정변수를 선별하기 위해 금형강에 반경이 2 mm 인 드릴을 이용하여 임의로 외부결함을 발생시킨 후 결함부위를 보수용접실험을 수행하였다.

Fig. 10 은 레이저빔과 와이어 공급장치와 시험편의 모식도이다. 그림에서 와이어와 레이저빔의

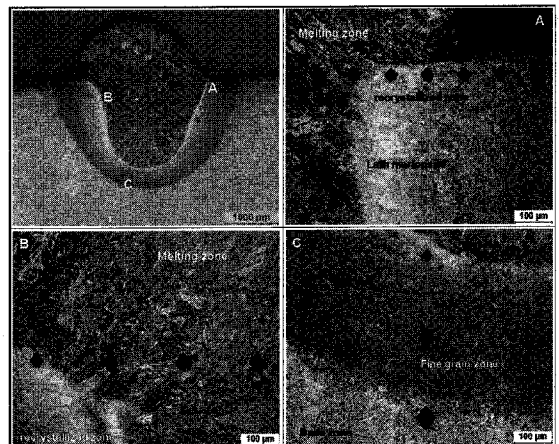


Fig. 9 Micro structure of rearing zone after repair welding

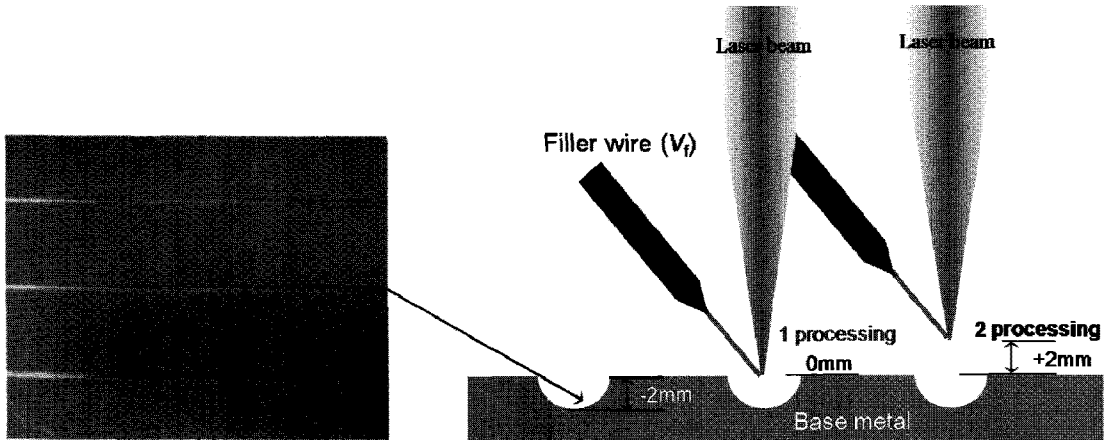


Fig. 10 Geometry of the rectangular cross-section used in the tests

비초점 거리를 모재의 표면에서 기준위치를 정하여 두 가지 공정을 변화시켜 실험을 진행하였다.

실험에 사용된 공정변수는 용가재가 모재와 용입된 형상 및 육성층의 형상에 대한 고찰을 한 결과로 H_2/H_1 의 종횡비가 1 에 가까운 변수를 사용하였다.

Fig. 11 은 금형 시험편에 외부 결함에 레이저 보수용접실험한 후 용접부 횡단면 비드를 보여주고 있다.

첫 번째 공정은 레이저 출력이 1,300 W 에서 용접속도와 피드와이어 공급속도가 0.5 m/min 로 느리게 진행할 경우 다른 공정에 비해 통계적 수치가 작게 나타났다. 그러나 H_1 의 크기 면에서는 레이저 출력이 1,400 W 로 가장 크고 용접속도와 피드와이어 공급속도가 빠르게 진행했을 때 가장 작은 비드 폭을 유지하고 있다.

그리고 와이어가 공급되는 위치 즉 공급방향에서 용착부족(incomplete penetration)현상이 발생하였다. 레이저 출력과 용접속도 변화에 따라 내부기공과 함께 커지는 경향이 나타났다. 그 결과 첫 번째 공정은 용가재가 용융되어 결함부위를 채우기 위한 체적이 작아 용착부족 현상이 발생하기 때문에 단일패스(single pass)보다는 2~3 회 보수용접을 실시하는 다층용접부(multi-pass weld)로 해소할 필요가 있다.

두 번째 공정은 앞선 첫 번째 공정을 2 회 조사하여 보수용접을 진행한 결과이다.

시험편 표면에 형성된 육성층 높이(H_1)은 기존의 1 회 보수용접을 실시한 결과와 유사하였고, 용융폭과 HAZ 가 약 10% 증가하였다. 반대로 H_2 의

크기는 거의 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 H_2/H_1 의 값이 1 에 가깝다.

이와 같은 결과 보수용접 후 시험편 표면에 육성층의 높이에 따라 레이저빔과 와이어의 조사위치(높이)를 판단하는 중요한 변수임을 알 수 있었다. 그러므로 추후 연구에서는 레이저 보수용접시 육성층의 높이와 최적의 공정변수의 상호관계를 규명하고자 한다.

4. 결론

본 연구는 금형 사용 중 발생할 수 있는 결함과 금형 제작시 발생된 결함에 대해 레이저빔에 의한 보수용접방법을 연구했고, 그 결과는 다음과 같다.

1) 레이저의 빔직경은 대개 약 1.5 mm 이므로 용가재의 직경과 공급위치가 중요한 변수이다. 특히 용가재의 공급방법에서 가공특성이 많이 달라진다. 본 연구에서 얻어진 결과는 레이저빔과 용가재를 동시에 조사(irradiated)하는 방법이 가장 적절하였다. 다만 용가재의 공급시간은 레이저 빔이 조사된 후 약 0.1sec 의 지연시간을 주었다.

2) 레이저 보수용접시 레이저빔의 비초점거리(f_a)는 +2 mm 로 하고, 피드와이어의 공급위치는 시험편 표면으로부터 +2 mm 이내로 유지하는 것이 중요하며, 이는 결함부위의 높이 즉, 육성층의 높이에 따라 위치가 달라지기 때문이다.

3) 레이저 보수용접에 대한 최적의 공정을 결정하기 위해 H_2/H_1 비와 용융단면 조직상태, 입열량에 관해 상호관계를 규명하였다. 그 결과로서

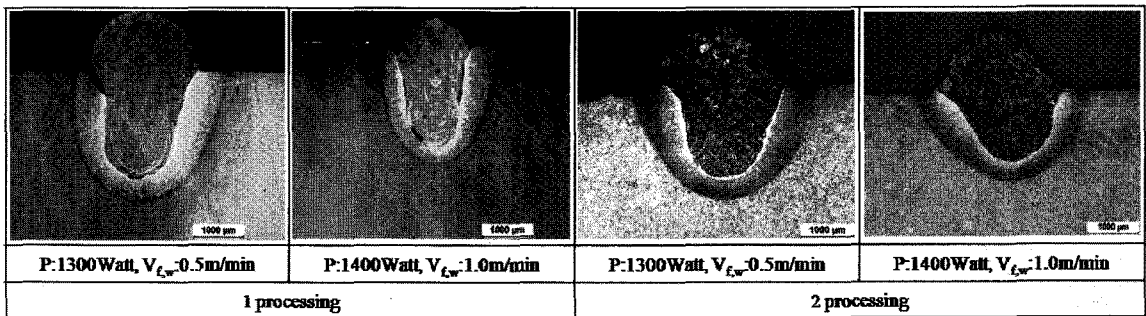


Fig. 11 Cross-section of plastic mold steel after laser repair welding

KP-4M 의 레이저 보수용접시 최적 공정은 H₂/H₁ 비가 1 인 공정과 입열량 범위가 65 ~ 75 J/mm² 에서 가장 안정적인 보수용접성을 가졌다. 이때 레이저빔의 출력과 용접속도와 용가제의 공급속도가 각각 1,300 W, 0.5 m/min 이었다.

4) 외부결함 발생부위에 레이저 보수용접실험을 진행한 결과 와이어가 공급되는 위치 즉, 공급방향에서 용착부족 현상이 발생하였다. 이러한 용착부족 현상은 레이저 출력과 용접속도변화에 따라 내부기공과 함께 커지는 경향이 나타났다. 이런 현상을 보완하기 위해 단일패스(single pass)보다는 2~3 회 보수용접을 실시하는 다층용접부로 해소할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Sun, Z. and Cuo, M., "Bridging the joint gap with wire feed laser welding," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, No. 1, pp. 213-222, 1999.
2. Orabi, A. G., Casalino, G., Benyounis, K. Y. and Hashmi, M. S. J., "An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO2 laser welding," *Advances in Engineering Software*, Vol. 37, No. 10, pp. 643-648, 2006.
3. Waheed, U. H., Andrew, J. P. and Lin, L., "A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping," *Applied Surface Science*, Vol. 247, No. 1-4, pp. 268-276, 2005.
4. Lee, J. H., Suh, M. H. and Han, Y. H., "Laser Cladding," *Journal of Korean Welding and Joining Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 154-162, 2000.
5. Vedani, M., Previtali, B., Vimercati, G. M., Sanvito, A.

- and Somaschini, G., "Problems in laser-repair welding a surface-treated tool steel," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 8, pp. 4518-4519, 2007.
6. Vedani, M., "Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 241-249, 2004.
7. Capello, E. and Previtali, B., "The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, No.1-3, pp. 223-232, 2006.
8. James, J. O. and Carl, N. W., "Laser Weld Repair of Tantalum Sheet," *The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System*, pp. 924-931, 1993.
9. Park, H. S., Jun, T. O. and Kim, D. H., "A Study on the Wear Characteristics and the Mechanism of KP-4M Steel for Plastic Molding," *Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 22-28, 1996.
10. Kim, G. S., Oh, Y. K. and Ahn, B. K., "A Characteristics of Heat Affected Zones in Weld Repair for a Damaged CrMoV Turbine Roter Steel," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 89-98, 1996.
11. Shin, H. J., Yoo, Y. T. and Oh, Y. S., "Characteristics of Surface Hardening of Dies steel for Plastic Molding using Continuous Wave Nd:YAG laser," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 71-81, 2009.
12. John, F. R., "LIA Handbook of Laser Materials Processing," LIA-Magnolia Publishing Inc., p. 402, 2001.