

## 2. 특집기사

### 레이저 하이브리드 용접과 레이저 브레이징 기술

#### Laser Hybrid Welding and Laser Brazing Technology



김 종 도  
Jong-Do Kim

• 한국해양대학교, 기관시스템공학부  
• e-mail : jdkim@mail.hhu.ac.kr



김 유 찬  
Yoo-Chan Kim

• BEST F.A 대표  
• e-mail : jimmy@best-fa.co.kr

#### 1. 서 론

레이저 빔과 아크를 하나의 용접 프로세스로 병합하는 기술에 관해서는 이미 70년대부터 알려져 왔으나 별다른 개발로 이어지지 못하다가<sup>1,2)</sup> 최근에서야 다시 눈을 돌리게 되었다. 이 기술의 핵심 과제는 아크의 장점과 레이저의 장점을 어떻게 단일 혼합 프로세스로 조합하느냐 하는 것이다<sup>3,4)</sup>. 과거 레이저빔을 처음 사용할 때 만해도 산업용으로 적합성을 증명해야 했으나 지금은 이미 자동차 산업에서 재래기술로 치부되고 있다.

레이저 용접에 타 용접 프로세스를 혼합하는 것을 하이브리드 용접 프로세스 (Hybrid welding process)라 한다. 이는 레이저 빔과 아크가 용융부에 동시에 작용하되 상호간 영향을 미치며 보완하는 것을 의미한다. 여기에 상상은 끝없이 현실화되고 있는데, 한 예로 CO<sub>2</sub> 레이저 용접을 들 수 있다. 최근 CO<sub>2</sub> 레이저 용접에 용가재를 이용한

GMA 용접 프로세스와의 혼합공정에 대한 기술적인 검증이 이루어지고 있다<sup>5)</sup>.

#### 2. 레이저 시스템

레이저 하이브리드 용접에서는 깊은 용입 용접 효과를 얻기 위하여 레이저의 출력이 높아야 할 뿐만 아니라 빔의 품질이 우수해야만 한다.

CO<sub>2</sub>레이저는 빔의 품질이 우수하기 때문에 절단 분야 공략에 성공하였으며 이 추세는 향후에도 계속될 것이 분명하다. 슬래브 레이저나 다이오드 여기형 레이저는 집광력과 빔의 품질이 높아 고강도를 얻을 수 있기 때문에 알루미늄의 절단이나 용접에 완벽하게 들어맞는다. 그렇기 때문에 슬래브 레이저나 다이오드 여기형 레이저가 향후의 특별한 대안으로 여겨지기도 하지만 강도가 높은 대신 접합 단면적이 낮아 사용범위가 제한된다. 특히, 겹치기 이음부에서의 정방향 맞대기 용접의

경우 더욱 그러하다. 지속적으로 출력이 증가되고 있는 Nd:YAG 고체 레이저는 이미 시장에 출시되어 있어 용접에 훨씬 더 많이 이용된다<sup>6)</sup>. 고체형 레이저는 유연한 광케이블로 전송되는데, 이는 레이저를 유도하기 위해 단단한 빔-압을 사용하는 CO<sub>2</sub> 레이저에 비해 상당한 장점을 가진다. 빔의 조작이 유연하면 객차 내부와 트렁크, 도어, 오프닝 후드 또는 동체 전면 끝단부까지 용접이 가능하다<sup>7)</sup>. 이에 비해 CO<sub>2</sub> 레이저는 아직 외부의 이차원 또는 간단한 삼차원 형상에 대한 용접에만 사용된다. 고효율의 소형 다이오드 레이저도 시장에 출시되기 시작하였다. 이 레이저는 레이저 브레이징에 적용되며 머지않아 박판에 대한 용접도 가능하게 될 것이다. 그렇다 하더라도 아직까지는 추가 개발이 필요한 상태이다. 열전도형 용접에서 깊은 용입 용접까지 가능 하려면 레이저 빔의 초점이 정확하면서도 출력이 증가되어야 하는데, 이와 관련하여 좀 더 보완이 필요하다. 현재 다이오드 레이저에 대한 비용(DM/kW)은 다른 고효율 레이저와 비슷하지만 다이오드의 가격이 내려감으로써 비용감소가 확실시되고 있다.

### 3. 레이저 용접 프로세스

파워 밀도  $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 까지를 열전도형 용접이라 하며, 그 강도를 증가시킬수록 용입은 깊어진다. 파워 밀도가 높기 때문에 모재에는 키홀(keyhole, cavity)이 형성되는데 이러한 키홀은 증발 물질의 증압 때문에 오픈된 상태로 남게 된다. 레이저 빔이 이 키홀을 통하여 모재로 깊숙이 침투하고, 응축된 증기가 키홀 주변을 흘러 응고되며 매우 얇은 용접 심(seam)을 형성한다<sup>8)</sup>. 기존의 대다수 용접 프로세스에서는 열전도작용으로 심 깊이가 형성되기 때문에 심은 넓은 반면 상대적으로 용입이 얇게 형성된다. 이러한 점을 비교해 볼 때 레이저 용접은 큰 장점을 가지게 된다<sup>9)</sup>.

### 4. 레이저 하이브리드 프로세스

금속 소재를 용접하기 위해서는 Nd:YAG 레이

저 빔의 강도가  $10^6\text{W}/\text{cm}^2$  이상이 되어야 한다. 레이저 빔이 모재의 표면에 충돌하는 순간, 충돌 지점이 기화점까지 가열되어 금속 증기가 흐르고 이로 인하여 용접 금속에는 키홀이 형성된다. 레이저 하이브리드 프로세스에서 용접 심의 두드러진 특징은 너비와 깊이간 비율이 높다는 것이다. 자유 아크의 에너지 유동 밀도는  $10^4\text{W}/\text{cm}^2$  을 약간 넘는다. Fig. 1은 레이저 하이브리드 용접의 원리를 설명해준다. Fig. 1에서 레이저 빔은 용접부 상부에서 아크와 더불어 용접 금속에 열을 가하는 것을 볼 수 있다. 하이브리드 용접은 두 가지 용접 프로세스가 각각 차례로 연속 반응하는 방식과는 달리 두 가지가 단일 용융풀로 동시에 혼합된다. 그 결과 두 프로세스는 상호간에 영향을 주게 되고 이로 인하여 다양한 강도와 특성을 얻게 되는데, 이것은 어떤 아크 프로세스와 레이저 프로세스를 사용하는가에 따라 달라질 수 있으며 또한 파라미터에 따라 달라질 수 있다.

독립된 용접 프로세스와 비교해보면 아크 열과 레이저 프로세스를 혼합 병행할 때 용입이 더 깊고 용접 속도가 향상된다는 것을 알 수 있다. 키홀로부터 증발되는 금속 증기는 아크 플라즈마에 반응한다. 유기 플라즈마중의 Nd:YAG 레이저 빔 흡수율은 극히 낮다. 레이저와 아크의 출력비를 어떻게 선정하는가에 따라 우수한 용접 프로세스의 특성이 나타날 것이다.

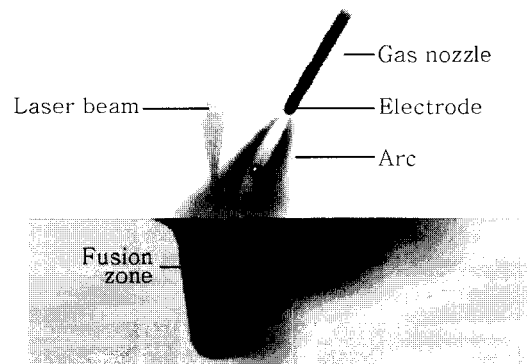


Fig. 1 Schematic representation of Laser Hybrid welding

모재의 온도는 레이저 빔의 흡수율을 결정하는 중요한 인자이다. 레이저 용접 프로세스를 시작하기 위해

사는 초기 반사문제를 반드시 극복해야만 하는데, 특히, 알루미늄의 경우 더욱 그러하다. 증발온도에 도달하면 키홀이 형성되므로 거의 모든 빔 에너지가 모재로 유입될 수 있다. 이를 위해 필요한 에너지는 온도에 따른 흡수량과 모재의 열전도에 기인한 에너지 산출량에 의해 결정된다. 레이저 하이브리드 용접에서는 모재의 표면 뿐만 아니라 용가재에도 증발 현상이 일어나기 때문에 더 많은 양의 하금속 증기가 발생하며 이로 인해 레이저 빔의 유입이 용이하게 된다. 이는 또한 용접이 중단되는 것을 방지하기도 한다. Fig. 2에서는 레이저 하이브리드 프로세스에서의 금속 이행 현상을 볼 수 있다.

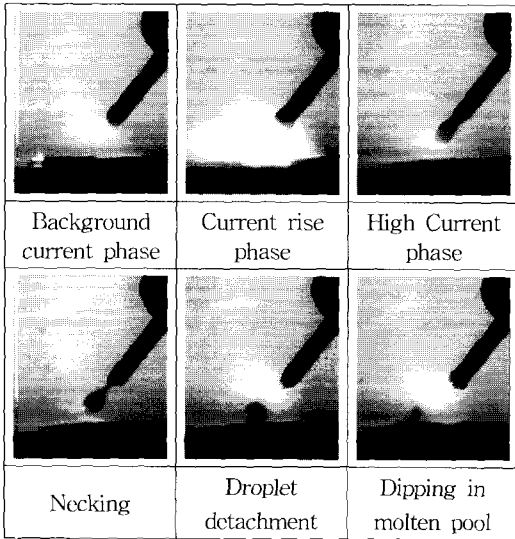


Fig. 2 Metal transfer

레이저, MIG 및 레이저 하이브리드 프로세스의 용입 특성을 비교해보면 레이저 프로세스의 용접 심은 오목한 반면, MIG프로세스의 경우 동일한 용접 속도와 용입 깊이에서 용접 여성이 충분하게 형성되고 심의 폭도 넓다는 것을 알 수 있다. 레이저 하이브리드 프로세스에서 동일한 용입을 얻기 위해서는 와이어 송급 속도만 반으로 줄이면 된다. Fig. 3에서 보듯이 레이저 하이브리드 프로세스에서는 와이어 송급 속도가 MIG프로세스에서 적용했던 11m/min에서 5.5m/min으로 감소된 것을 볼 수 있다.

레이저 하이브리드 헤드에는 충돌 보호 기능이 통합되어 있어 충돌 상황 발생 시 즉시 로봇 스위치가 꺼진다. 이 때 토치 역시 시작 위치로 돌아가기 때문에 계속해서 용접이 가능하다.

## 5. 자동차 산업에의 적용

MIG용접은 갭브리징 능력(gap bridging ability)이 우수하며 심 가공(그루브)의 필요성이 많지 않다는 장점이 있다. 이에 반해, 레이저 용접은 열유입부가 집중되어 용입이 깊고 속도가 빠르다는 장점을 가진다.

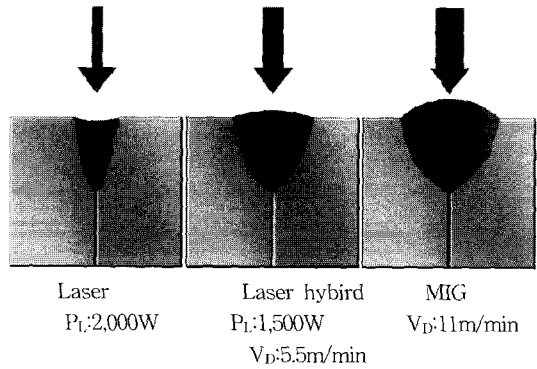


Fig. 3 Comparison between the seam geometry of laser, MIG and Laser hybrid welding seams with the same penetration depth and the same welding speed

VW Phaeton 모델의 도어 용접에는 MIG용접, 레이저 용접과 함께 레이저 하이브리드 프로세스가 적용되었다<sup>10)</sup>. 도어 하나에는 총 66 군데의 심이 용접된다. 이 가운데 MIG용접 심이 7군데 380mm, 레이저 용접 심이 11군데 1,030mm, 그리고 레이저 하이브리드 용접 심 48군데로 길이는 3,570mm이다. 레이저 하이브리드 용접이 적용되는 부분은 알루미늄 압출부와 캐스팅, 박판이다. 용접 심은 주로 겹치기 이음부의 필릿 용접 심이며 맞대기 용접 심도 일부 있다.

도어에서 요구되는 견고함을 충족시키면서 동시에 무게를 줄이기 위해서는 박판과 캐스팅, 압출재질의 소재가 알맞게 조화되어야 한다. 다양한

부위에서 이 소재들은 주어진 용접 속도와 공차 때문에 레이저 하이브리드 프로세스만으로 접합이 가능하다. 하이브리드 프로세스가 아니었다면 VW은 무거운 캐스팅 소재를 사용했어야 했을 것이다.

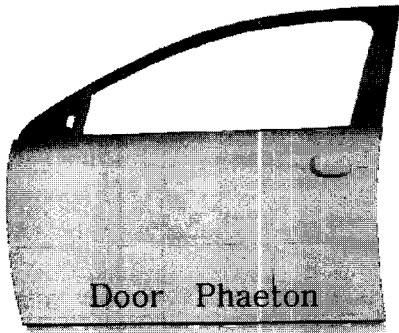


Fig. 4 Laser hybrid welded door of the Phaeton of VW

하이브리드 프로세스를 Phaeton 도어의 총 용접심 길이 4,980mm에 모두 적용하지 않은 것은 각 심의 특성을 고려했기 때문이다. 다시 말하면 갭의 폭이 너무 넓다면 레이저 하이브리드 프로세스의 레이저 역시 별로 유용하지 않을 것이다. 이 경우 MIG프로세스만으로 용접하는 것이 훨씬 더 좋은 방법이다. 반대로 갭의 폭이 좁을 경우 입열량이 작고 속도가 빠른 레이저 프로세스 단독으로 용접하는 것이 최선책이 될 것이다. 그러나 레이저 하이브리드 프로세스는 적용성이 광범위하여 탄력적으로 사용할 수 있다. 즉, 레이저와 MIG프로세스의 분배를 다양화하여 여러 가지 용접 조건에 맞추어 사용할 수 있다. 물론, 레이저 하이브리드 시스템으로 레이저 프로세스나 MIG 프로세스를 단독으로도 사용할 수도 있다. 이 경우, 사용하지 않는 다른 한 프로세스는 스위치를 오프시켜 놓아야 한다. 용접 작업에 따라 용접 속도도 매우 다양한데, Phaeton 도어의 맞대기 용접의 경우를 예로 들어 보자. 모재로 유입되는 레이저 출력 2~4kW에서 용접 속도는 1.2~4.8m/min까지, 와이어 송급 속도는 4~9m/min까지 가능하다. 가장 좋은 결과는 레이저 출력 2.9kW, 용접 속도 4.2m/min, 와이어 송급 속도 6.5m/min에서 얻

을 수 있었다.

레이저 하이브리드 시스템은 또한 신형 Audi 8에도 적용되었다<sup>11)</sup>. Aluminum Zentrum in Neckarsulm의 레이저 빔 기술을 담당하고 있으며 Audi 신형 톱모델에 적용할 하이브리드 용접 프로세스 개발에서 중요한 역할을 한 바 있는 Stephan Helten은 다음과 같이 강조하고 있다.

두 가지 접합 프로세스를 혼합함으로써 다양한 시너지 효과를 얻을 수 있게 되었다. 우리는 생산성이나 비용, 심의 품질, 공정의 안정성 등에서 열에 의한 접합 프로세스가 가진 한계를 넓혀가고 있다.

Audi A8 한 대당 총 용접 심의 길이는 4.5m이다. A8의 경우 레이저 하이브리드 용접은 다양한 기능성 박판으로 이루어진 측면 루프 프레임부에 적용된다.

## 6. 레이저-하이브리드에 의한 시너지

아크와 레이저 빔을 혼합함으로써 다음과 같은 이점을 얻을 수 있다.

먼저, 레이저 용접과 비교해 볼 때 레이저 하이브리드 프로세스의 장점으로 다음과 같은 특징이 있다.

- 단구간의 갭에 대한 갭브리징 능력이 우수하다.
- 용입의 폭이 넓고 깊다.
- 적용 범위가 상당히 다양하다.
- 레이저 출력을 낮춤으로써 투자 비용이 줄어든다.
- 인성이 증가한다.

다음으로, MIG용접과 비교해 볼 때 레이저 하이브리드 프로세스의 장점은 다음과 같다.

- 용접 속도가 빠르다.
- 속도가 빠르면서도 용입이 깊다.
- 입열량이 낮다.
- 강도가 높다.
- 심의 폭이 좁다(과도하게 넓지 않다).

레이저 빔과 아크를 혼합하면 레이저 용접에서보다 용융풀이 넓게 형성되기 때문에 갭이 넓은 소재도 용접이 가능하다. 아크 용접은 에너지원에

대한 비용이 적게 들고 갭브리징 능력이 우수하며 와이어를 사용하므로 미세구조에 영향을 줄 수 있다는 특징을 가진다. 반면 레이저 용접의 특징으로는 용입이 깊고 용접 속도가 빠르며 열유속이 낮고 심이 좁다는 점을 들 수 있다. 금속 소재의 경우, 레이저 빔은 밀도가 높아 깊은 용입 용접 효과를 생성하므로 레이저 출력만 충분하다면 두꺼운 소재의 용접도 가능하다.

이와 같이 레이저 하이브리드 용접에서는 아크와 레이저 빔 간의 상호작용 덕분에 빠른 용접 속도에서 공정의 안정성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 공차의 범위도 넓어진다. 또한 MIG프로세스에 비해 용융풀이 작기 때문에 입열량이 낮아져 열영향부가 좁아지므로 변형이 감소하고 사후 교정에 필요한 시간을 단축시킬 수 있다. 용융풀이 두 개로 분리될 경우 레이저 빔에 의해 용접된 부위는 특히, 스틸의 경우 아크를 통해 열의 유입이 이어지므로 담금질이 되어 경도 최고치를 떨어뜨릴 수 있다. Fig. 6에는 혼합 프로세스의 장점이 잘 나타나 있다. 용접 속도가 상승되면 제조 시간이 줄어들고 결과적으로 제조 비용이 낮아진다<sup>10)</sup>.



Fig. 5 Laser beam hybrid welding at Audi: OEM in Ingolstadt applies the process for 4.5m of weld seams in the roof area of the new A8 and thus achieves higher welding speeds and stronger seams. (Photo: Audi)

## 7. 레이저 브레이징

레이저 브레이징 프로세스는 레이저 용접과는 달리 브레이징 접합부를 동시에 가열하기 위하여

모재상의 집광빔 직경이 커야 한다. 아연은 약 420℃에서 녹기 시작하여 906℃에서 증발한다. 이러한 특성은 용접 프로세스에 부정적인 영향을 미친다. 아크가 점화될 때 이미 아연이 증발되기 시작하기 때문이다. 아연 증기와 산화물은 기공 형성과 용융 불량, 크랙 발생, 불안정한 아크의 원인이 될 수 있다. 그러므로 아연도금된 판재는 용융풀로의 입열량이 낮은 접합 프로세스가 보다 효과적이다.

전해 아연 도금 판재의 아연 도금층은 보통 3~20μm의 두께를 가지고 있다. 아연은 스틸의 부식을 방지하는 역할을 하는데, 이는 표층의 방식효과 원리로 설명된다. 아연층은 또한 손상 시 전기적인 부식을 방지하기도 한다. 브레이징을 이용하면 도금된 판재의 절단면을 보호하고 냉열이 줄어드는 동안 발생하는 미소균열을 방지할 수 있다. 따라서 절단면은 전기 화학적으로도 보호된다. 아연 도금 판재를 용접하게 되면 용접 심부의 도금층이 손상되거나 파괴되므로 접합부가 부식되기 쉽다. 그러나 브레이징의 경우, 심 자체가 부식되지 않는다. 입열량이 낮기 때문에 기화되는 부위도 브레이징 심 바로 옆에 0.2-0.3mm정도로 좁게 형성된다. 그렇지만 이 부위도 아연의 음극 효과로 인해 부식되지 않으므로 문제 되지 않는다.

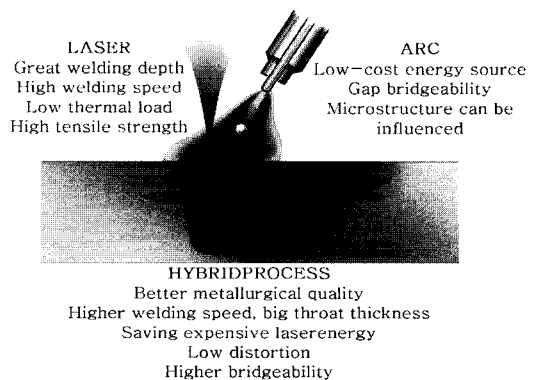


Fig. 6 Advantages by combining the process

이상과 같은 특성과 장점을 비추어 볼 때, 브레이징 와이어가 용접 와이어보다 가격이 상당히 높을지라도 레이저 브레이징 프로세스가 기존의 용

접 프로세스를 대신할 수 있는 흥미로운 접합 기술임에는 틀림없다. Fig. 7은 레이저 브레이징 프로세스의 원리를 설명하고 있다. 이제 레이저 브레이징을 적용하여 아연 도금 소재도 까다로운 조건을 만족시키면서 접합할 수 있게 되었다. 용가재로는 보통 구리 재질의 브레이징 와이어가 사용되며 이밖에도 다양한 합금이 사용된다. Cu-Si 두 가지 성분이 혼합되면 950℃에서 1,050℃ 사이에서 녹는점이 형성된다. 이 밖에도 녹는점이 낮은 구리 합금 와이어로는 SG-CuAl8과 SG-CuSn이 있다. 최근 브레이징 와이어 분야에서 개발의 지향점은 용융점을 낮추거나 특수한 금속적 특성을 얻는 것이다<sup>11)</sup>. 와이어를 예열하면(이른바 레이저 핫-와이어 프로세스) 브레이징 속도가 증가하여 와이어의 용융량이 많아지게 된다.

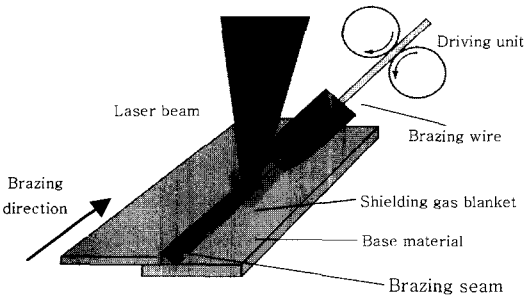


Fig. 7 Schematic representation of the laser brazing

Fig. 8과 Fig. 9는 겹치기 이음부에서의 필릿 용접부와 플랜지-조인트에서의 필릿 용접부의 단면을 각각 보여주고 있다. 모재는 두께 1.5mm의 전해 아연 도금 냉간 압연강이다(DC04ZE+25/25/ 1.0338). 이 재질은 한 쪽면의 아연 도금 층이 18g/m<sup>2</sup>로 두께로 계산해보면 약 3μm정도이다. 항복점 220N/mm<sup>2</sup>에서 모재의 인장강도는 270-350 N/mm<sup>2</sup>이다. 와이어는 DIN1733 SG-CuSi3 1.6mm가 사용되었다.

### 8. 하이브리드 헤드

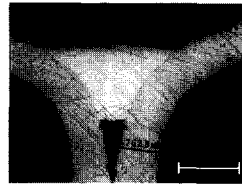
용접 헤드(Fig. 10)에서 가장 중요한 조건은 용접 소재로의 접근성을 보장하기 위해 가능한 한

크기가 작아야 한다는 점이다. 특히, 차체 제작에서는 필수적인 조건이다. 또한 용접 헤드는 180°까지 회전이 가능하도록 디자인 되어 경상(mirror image)으로써 설치할 수 있다. 또한 로봇 치구 보다 수직 조절 범위가 넓어 3차원 소재에 대한 접근성이 향상되어야 한다.



Base material : DC04+ZE25/25  
Plate thickness : 1.5mm  
Filler material : SG CuSi3  
Brazing speed : 3m/min  
Current : 206A

Fig. 8 Laser brazing; fillet weld on the lap joint



Base material : DC04+ZE25/25  
Plate thickness : 0.8mm  
Filler material : SG CuSi3  
Brazing speed : 3m/min  
Current : 210A

Fig. 9 Laser brazing; fillet weld at flanged joint

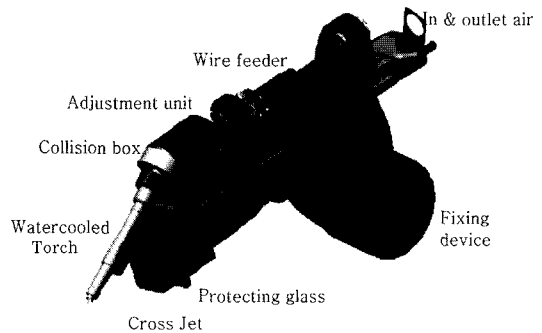


Fig. 10 Laser hybrid welding head

추적 장치에 조절기가 부착되어 있으므로 레이저 빔에 대하여 와이어를 전후, 좌우, 상하의 모든 방향에서 자유자재로 움직일 수 있다. 그러므로 접합 프로세스에서는 심과 출력, 와이어 종류, 와이어 품질 및 접합 작업 등의 여러 가지 다양한 조건에 따라 조정하여 사용할 수 있다.

용접 중 발생하는 스패터는 보호유리를 오염시키게 된다. 반사방지 물질로 이중 코팅 처리된 석

영유리는 레이저 광학계가 손상되지 않도록 보호하는 역할을 한다. 이 유리에 스패터가 붙게 되면 모재로 유입되는 출력이 오염도에 따라 90%까지 감소될 수 있다. 대개 오염이 심하면 레이저 빔 에너지가 보호유리로 흡수되어 유리 표면에 열응력을 발생시키게 되므로 유리가 깨진다. 이를 방지하기 위한 것이 바로 크로스 제트(cross jet)이다. 크로스 제트는 스패터를 90°까지의 각도로 빗나가게 만들 뿐만 아니라 스패터가 유리 표면에 닿기 전에 배제시키게 된다. 크로스 제트 노즐은 에어 방출구 끝단에서 증속되도록 설계되어 초음파 유속으로 스패터를 쉽게 날려버릴 수 있다. 노즐에서 방출되는 에어는 용접부로 들어가지 않도록 에어 방출관을 통해 취출된다. 용접 스테이션 역시 용접품이나 스패터로 오염되지 않기 때문에 항상 깨끗한 환경에서 작업할 수 있다.

이중 냉각 시스템 토치는 레이저 출력 4kW, 250A 전류에서 100%의 듀티사이클을 얻도록 설계되었다.

## 9. 결 론

레이저 하이브리드 신기술로 얻어지는 시너지 효과는 접합 기술 분야에 대한 적용 범위를 매우 넓게 열어 주고 있다. 특히, 접합부의 공차가 커 레이저 용접으로는 불가능하거나 가능하다 하더라도 많은 비용이 들 경우 효과적으로 도입할 수 있다. 이처럼 적용범위가 광범위하고 효율이 높기 때문에 투자 비용을 줄이고 제조시간이 단축되어 생산성을 높이면서 제조원가를 절감할 수 있게 되었다. 그 만큼 경쟁력이 높아질 수 밖에 없다. 레이저 하이브리드/브레이징 시스템은 협소한 접합 형상에 대한 새로운 가능성을 열어주고 있다.

그러나 최근 고출력의 고체 레이저가 상용화되기 전까지는 안정된 프로세스를 얻을 수 없었다. 그 동안 레이저와 아크의 혼합 프로세스에 대한 기본 정보를 바탕으로 다양한 검증이 이루어졌다. 하이브리드 용접은 단일한 프로세스 영역(플라즈마 및 용융풀)에서 레이저 빔과 아크 용접이 혼합 작용하는 프로세스로 정의할 수 있다. 조건에 따

라 적합한 파라미터를 선택함으로써 형상과 구조 등의 심 특성에 의도한 바대로 영향을 미칠 수 있다. 아크 용접은 부가적으로 용가재를 사용하므로 갭브리징 능력이 우수하여 심의 폭이 넓다. 따라서 용접 심 준비에 소요되는 시간이 절감된다. 이렇듯 각각의 프로세스가 가진 장점을 살려 상호작용이 이루어짐으로써 프로세스의 효율은 현저하게 높아질 수 있다.

## 참고문헌

1. J. Matsuda, A. Utsumi, M. Katsumura, M. Hamsaki, S. Nagata: TIG or MIG arc Augmented Laser Welding of Thick Mild Steel Plate. *Joining & Materials* 1988
2. Steen et al.: Arc-augmented Laser Welding. 4th Int. Conf. On Advances in Welding Processes, Paper No. 17 (1978) pp. 257-265
3. H. Cui: Untersuchung der Wechselwirkungen Zwischen Schweisslichtbogen und Fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten Kombiniertes Laser-Lichtbogentechnik. TU Braunschweig, Dissertation, 1991
4. C. Maier, J. Beersiea, K. Neuenhahn: Kombiniertes Lichtbogen-Laserstrahl-Schweißverfahren On-line Prozessüberwachung. *DVS* 170 (1995) S.45-51
5. C. Haberling: Prozesstechnische Untersuchungen des CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweissens mit Zusatzdraht und in Kombination mit dem MIG-Schweißverfahren. Dipolmarbeit, RWTH, Lehrstuhl für Lasertechnik, 1994
6. F. Dausinger: Hohe Prozesssicherheit beim Aluminium-schweissen mit Nd:YAG-Lasern. *Bleche und Profile* 42 (1995) Nr. 9, S 544-547.

7. H.-G. Treusch, H. Junge: Laser in der Material-bearbeitung, Schweißen mit Festkörperlasern, Band 2, VDI-Verlag, 1995.
8. E. Beyer: Schweißen mit Laser: Grundlagen, Springer-Verlag, 1997.
9. Steen: Laser Material Processing, Springer Verlag, 1996.
10. T. Graf., Stuffer H.: LaserHybrid at Volkswagen. IIW- Doc. XII-1730-02
11. S. Helten: Qualifizierung und Implementierung des Lichtbogenunterstützten Lasersrahlsschweißverfahrens in den Fertigungsprozess im Aluminiumkarosserieleichtbau. Diplomarbeit Audi, RWTH(ISF) Aachen 1999