

Nd:YAG 레이저-아크의 하이브리드용접 기술

이 목 영 · 김 기 철 · 권 영 각

Technical Investigation on Nd:YAG Laser - GMA Hybrid Welding

Mok-Young Lee, Ki-Chul Kim and Young-Gak Kweon

1. 서 론

최근의 국제경제는 통신 및 교통수단의 발달에 따라 물리적 거리상의 제약이 사라져 가고 있다. 또한, 국가 간의 무역장벽이 철폐되어짐에 따라 전 세계는 하나의 시장으로 통합되어 가는 추세이다. 이러한 사회 환경에서는 일등만이 생존이 가능하기 때문에 기업들은 각자의 분야에서 최고로 군림하기 위하여 모든 역량을 집중시키고 있다.

자동차산업에서는 비용을 유지 혹은 감소시키면서도 연비와 안전도를 향상시키기 위한 기술을 개발하고 있다. 조선, 중공업 및 강관산업 등에서는 생산성 및 품질을 향상시키기 위하여 노력하고 있다. 이러한 조건을 충족시키기 위해서는 고기능성 소재 및 고속용접기술의 적용이 요구된다. 특히 소재의 기능이 고도화 혹은 다양화되면 용접성이 저하되므로 새로운 고급 용접공정의 개발이 요구된다.

레이저 용접은 고밀도로 집속된 레이저빔을 이용하여 소재를 가공하는 방법으로 열변형이 적고, 생산성이 높고, 소재의 제약이 거의 없는 새로운 용접기술이다¹⁾. 그러나 레이저용접은 여러 가지 장점에도 불구하고 이음부 관리가 까다롭고, 용입 혹은 용접속도에 한계가 있으며, 고강도강에서 용접부가 경화되어 사용에 제약이 따른다²⁾.

레이저-아크 하이브리드 용접은 레이저빔과 아크 열원을 동시에 사용하여 서로의 단점을 보완하는 새로운 용접공정이다³⁻⁵⁾. 이 용접공정에서는 아크열에 의한 소재의 예열효과로 인하여 레이저빔의 효율이 향상된다. 또한 와이어를 사용하므로 이음부 관리수준이 완화되며 특히, 아크열로 용접와이어를 용융시키므로 레이저빔의 손실이 적다.

Nd:YAG 레이저는 파장이 짧기 때문에 빔의 광섬유

전송이 가능하다. 직경이 작은 광섬유는 일정 곡률반경 이상에서 자유자재로 구부리는 것이 가능하다. 광섬유에 의한 레이저빔의 전송은 로봇을 이용한 3차원 형상의 용접에 유리하다⁶⁾.

CO₂ 레이저와 마찬가지로 Nd:YAG 레이저 빔과 아크의 하이브리드 용접도 가능하다. Nd:YAG 레이저를 이용한 하이브리드 용접은 아크 플라즈마에 의한 레이저빔의 간섭 및 빔전송의 제약이 적은 장점이 있다. Nd:YAG 레이저와 아크의 하이브리드 용접은 자동차 차체 혹은 강관의 원주용접 등에 적용이 추진되고 있다^{7,8)}. 그러나 이 용접공정은 장비가 고가이며, 공정변수가 복잡하고 관리가 까다롭기 때문에 제조공정에 실 적용이 어렵다.

본 고에서는 Nd:YAG 레이저와 아크의 하이브리드 용접공정에서 주요한 기술의 현황을 분석하고 실제 연구 사례를 제시하여 생산현장의 적용에 도움을 주고자한다.

2. Nd:YAG 레이저 - 아크 하이브리드 용접

2.1 Nd:YAG 레이저 - 아크 하이브리드 용접 기술

Nd:YAG 레이저는 전술한 바와같이 파장이 1,064nm로 짧기 때문에 레이저 빔의 광섬유 전송이 가능하여 3차원의 복잡한 형상을 갖는 부재의 용접에 유용하다. 자동차 혹은 조선산업과 같이 생산속도가 빠르고, 용접 길이가 긴 경우에는 연속과 발전방식의 대출력 레이저가 사용된다. 그러나 이러한 대출력 CW Nd:YAG 레이저는 CO₂ 레이저에 비하여 늦게 산업에 적용되어 기술의 성숙도가 상대적으로 낮다. 또한 현재 상용화된 장비는 최대 출력이 6kW 가량으로 낮으므로 제한된 분야에서 적용이 진행되고 있다.

Nd:YAG 레이저와 아크의 하이브리드 용접은 1994년 독일 Fraunhofer Institute의 Diltthey에 의하여 처음으로 시도되었다⁹⁾. 초기에는 Nd:YAG 레이저의 출력이 낮았기 때문에 TIG 아크를 보조열원으로 사용하여 용접속도를 향상시키고자 하였다. 그 후로도 Nd:YAG 레이저와 TIG 아크의 하이브리드 용접에 관한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 그러나 출력이 높은 Nd:YAG 레이저 발전기가 개발됨에 따라서 TIG 아크와의 하이브리드 용접은 장점이 줄어들고 있다.

이에 반하여 GMA 용접과 Nd:YAG 레이저의 하이브리드 용접은 와이어에 의한 용융부족 보충, 이음부 간극 허용도 증대, 용접부 화학성분 제어 등의 장점이 있다. 2001년 독일 Fraunhofer Institute의 Beyer는 Nd:YAG 레이저와 GMA의 하이브리드 용접에 관한 연구 결과를 발표하였다¹⁰⁾. 그 이후로 이 기술에 대한 연구가 활발히 진행되어 현재 산업현장에 적용이 가장 활발히 진행되고 있다.

Fig. 1은 Nd:YAG 레이저와 GMA 하이브리드 용접의 개념을 나타낸 것이다. 피용접재와 GMA 용접 와이어의 사이에 전류를 인가하여 아크를 형성시키면 아크 열에 의하여 피용접재의 표면 및 와이어가 용융되어 용융지가 형성된다. 발전기에서 발생한 레이저 빔을 광섬유를 통하여 레이저 헤드에 전송하고, 집속 광학렌즈에 의하여 용융지에 집속시키면 키홀형성에 의하여 깊은 용입이 이루어진다.

2.2 Nd:YAG 레이저-GMA 하이브리드 용접 시스템

최대 출력 2kW의 CW Nd:YAG 레이저와 350A 급 인버터제어형 아크용접기로 하이브리드 용접 시스템을 구성하였다. Fig. 2는 실험용 Nd:YAG 레이저와 GMA의 하이브리드 용접 장치의 헤드부를 나타낸 것이다. 2

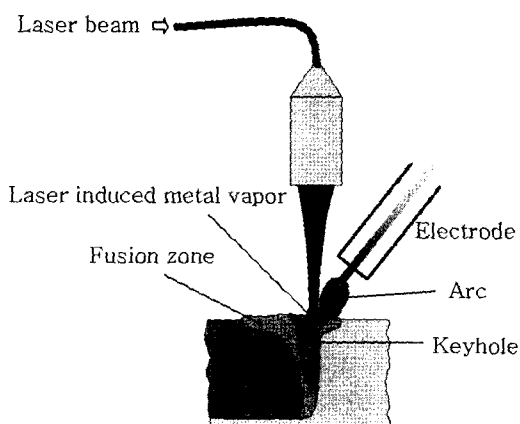


Fig. 1 Schematic view of Nd:YAG laser-GMA hybrid welding

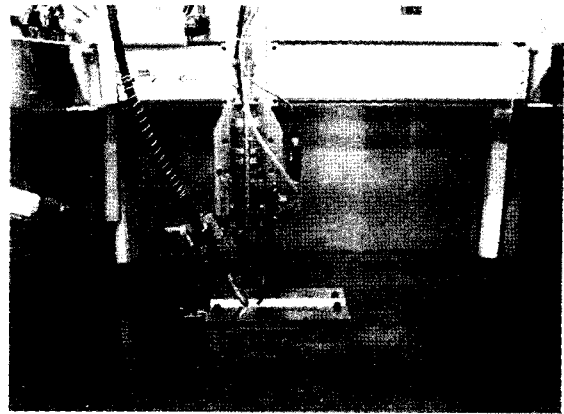


Fig. 2 Nd:YAG laser-GMA hybrid welding system

축 직교좌표 로봇에 레이저 헤드가 장착되어 직선 용접이 가능하며 초점위치가 자유자재로 조절된다. 헤드 고정 브라켓에는 2축 직선 이송 및 회전이 가능한 스테이지가 연결되어있다. 이 스테이지에 GMA 용접 토치를 장착하여 레이저 빔과 아크의 거리 및 토치의 각도 조절이 가능하다. 하이브리드 용접 헤드의 아래에는 GMA 용접 전원과 전원케이블에 의하여 연결된 시편 고정 지그가 설치되었다. 용접중에 산란된 Nd:YAG 레이저 빔이 작업자에 노출되는 것을 방지하기 위하여 헤드 이송 로봇, 시편 고정 지그 및 하이브리드 용접헤드는 스테인리스 강판으로 밀폐된 캐비닛에 설치하였다.

2.3 하이브리드 용접에서의 아크 파형

GMA 용접에서 아크 전압과 용접전류의 파형은 아크 전원 및 와이어 송급속도의 설정값에 따라 변화한다. 이들은 또한 와이어 돌출길이, 분위기 가스의 조성 및 와이어 직경 등에 따라 변화한다. 레이저-아크 하이브리드 용접에서 아크는 키홀로부터 분출되는 레이저 플라즈마에 의하여 영향을 받는다. 이러한 레이저 플라즈마에 의하여 피용접재와 와이어 사이의 전기저항이 감소하므로, 아크전압은 감소하는 반면 용접전류는 다소 증가하는 것으로 알려졌다.

Fig. 3은 GMA 용접에서 아크전압 및 용접전류의 파형을 나타낸 것이다. 인버터 제어형 펄스 전원을 사용하여 전압파형에서는 다수의 침두파형이 관찰된다. 용접전류에서 침두값을 보이는 부분은 용적이 이행되는 부분이며, 용적이행 주기는 10Hz 가량이다. 아크전압 및 용접전류의 평균값은 각각 154A 및 24V 이었다.

Fig. 4는 Nd:YAG 레이저 및 GMA의 하이브리드 용접에서 아크전압 및 용접전류의 파형을 나타낸 것이다. 대체적인 경향은 GMA 용접과 유사하였으며, Steen

의 연구결과에서 보여주는 바와같은 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다. 그 이유는 아크 전원의 형태가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 하이브리드 용접에서 아크전압 및 용접전류의 평균값은 각각 165A 및 23V 이었

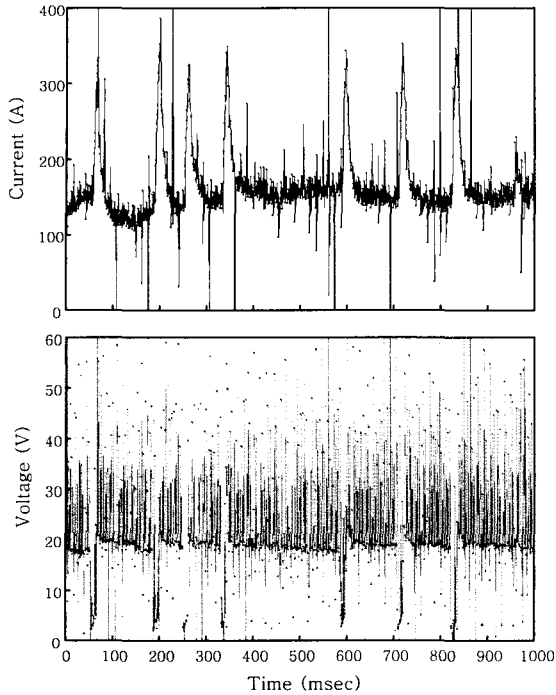


Fig. 3 Arc voltage and welding current waveform in GMA welding

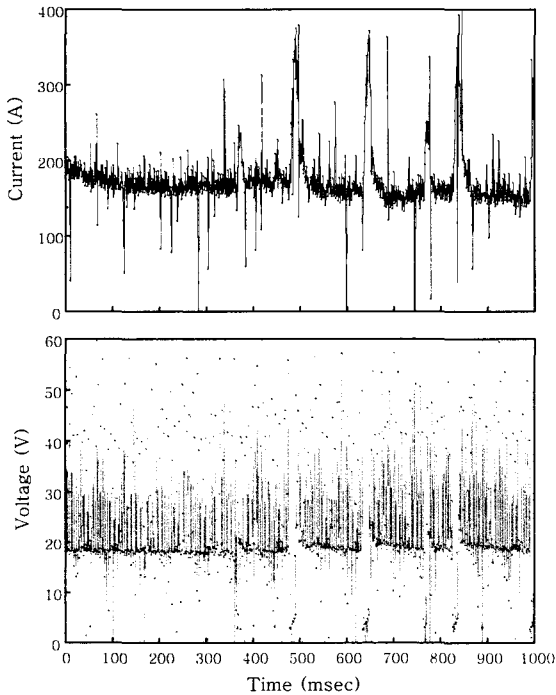


Fig. 4 Arc voltage and welding current waveform in hybrid welding

다. 레이저 플라즈마에 의하여 아크전압 및 용접전류 파형에서의 뚜렷한 변화는 없었으나, Steen 연구결과와 유사하게 아크 전압은 감소한 반면 용접전류는 다소 증가하였다. 하이브리드 용접에서는 고온의 레이저 플라즈마에 의하여 용적의 온도가 증가한다. 따라서 와이어 선단으로부터 용융지로의 용적 이행형태는 직경이 작은 용적이 다수가 이행되는 입상이행형태와 유사한 형태일 것으로 예상된다. 그러나 하이브리드 용접에서 용적이행주기는 5Hz 가량으로 GMA 용접에 비하여 길었다.

2.4 하이브리드 용접에서의 용적이행현상

GMA 용접에서 용적이행은 중력, 용적의 표면장력 및 전자기력에 의하여 이행된다. 하이브리드 용접에서는 레이저 플라즈마에 의하여 용적의 온도가 증가하여 용적의 크기가 상대적으로 작고 이행주기는 빠를 것으로 예상되었다. Fig. 5는 GMA 용접에서 용적이행현상을 나타낸 것이다. 용적의 하부와 용융지 사이에 형성된 아크에 의하여 와이어 선단이 용융되어 용적의 크기가 증가 하였다. 일정 직경 이상으로 용적의 크기가 증가하면 와이어 선단부의 용적이 잘록해지면서 용적이 와이어로부터 이탈되고 아크는 와이어 선단으로 이행된다.

Fig. 6은 하이브리드 용접에서 용적이행현상을 나타낸 것이다. 아크플라즈마의 기저에 해당하는 용융지 상부에서 밝게 보이는 부분은 레이저가 조사된 부분이다. 키홀 상부의 레이저 플라즈마 및 용융지로부터 반사된

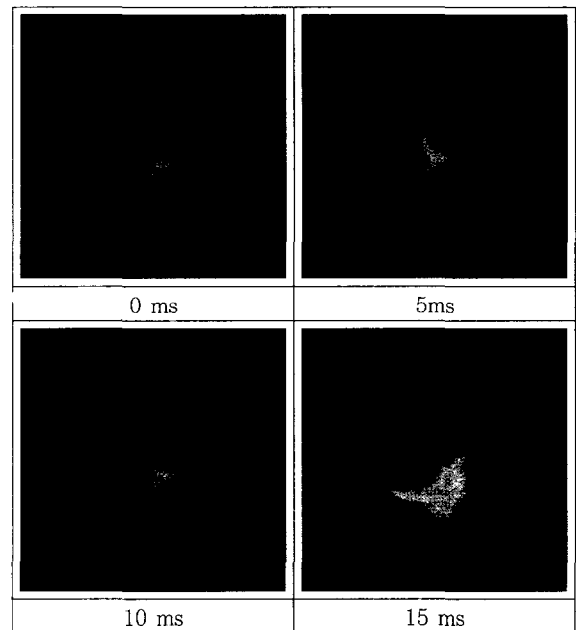


Fig. 5 Metal transfer in GMA welding

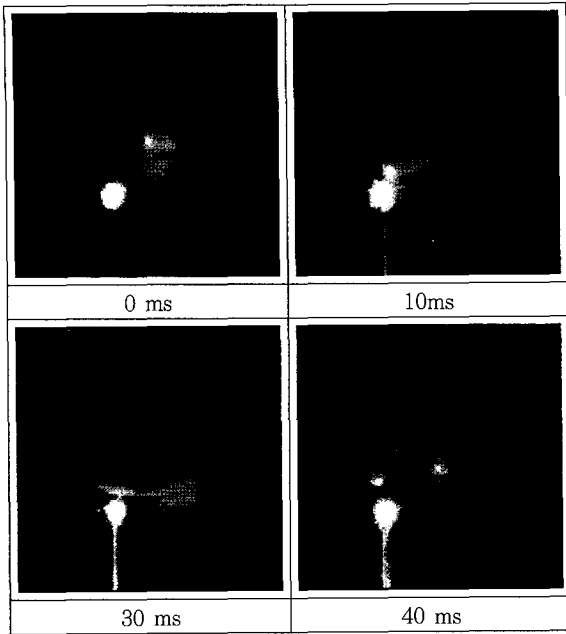


Fig. 6 Metal transfer in hybrid welding

레이저 빔에 의하여 용적의 온도가 높고 용적의 성장속도가 빠른 것으로 관찰된다. 그러나 킨홀에서 분출되는 플라즈마 압력에 의한 부상효과로 인하여 용적이행이 억제되었다. 30ms 지점의 사진에서 용적은 수평방향으로 연신된 타원형태를 보였다. Fig. 7은 CO₂ 레이저와 GMA의 하이브리드 용접에서 아크 플라즈마와 레이저 플라즈마의 상호작용을 나타낸 것이다. 아르곤 분위기를 사용하는 경우 CO₂ 레이저 용접에서는 다량의 분위기 가스 플라즈마가 발생된다. 하이브리드 용접에서는 아크플라즈마로부터 공급되는 플라즈마에 의하여 레이저 단독용접에 비해서도 훨씬 많은 플라즈마가 형성된다. 그러나 Nd:YAG 레이저를 이용한 하이브리드 용접에서는 분위기 가스에 의한 플라즈마가 거의 형성되지 않고, 레이저와 아크 플라즈마의 상호작용은 관찰



Fig. 7 Metal transfer in CO₂ laser - GMA hybrid welding

되지 않았다. 따라서 Nd:YAG 레이저-GMA 용접은 CO₂ 레이저에 비하여 공정상의 안정성이 높을 것으로 판단된다.

3. 하이브리드 용접부 특성

3.1 하이브리드 용접부 비드 형태

GMA 용접에서 용접부는 폭이 넓은 반면 제한된 용입깊이를 갖는 용접비드가 형성된다. 특히 용접부 상부에는 다량의 용융와이어가 용착되어 아크 용접부는 모재 표면에 비하여 상당히 돌출되어 있다. 하이브리드 용접부의 비드외관을 Fig. 8에 나타내었다. 실험에 사용된 조건은 레이저 출력 2kW, 용접속도 2m/min 및 분위기 가스는 20%CO₂ 가스가 혼합된 Ar이었다. 아크 파워가 증가함에 따라 비드폭이 다소 증가하는 것으로 보이나 뚜렷한 차이는 관찰되지 않는다. 아크 파워가 높은 경우 스패터의 발생이 증가하였다.

Fig. 9는 레이저용접 및 하이브리드 용접부 단면 비드형상을 나타낸 것이다. 레이저 단독용접의 경우 이음부 모서리를 밀링 가공하여 간극이 거의 없었음에도 불구하고, 용융부족으로 인하여 비드 상부 및 하부가 함

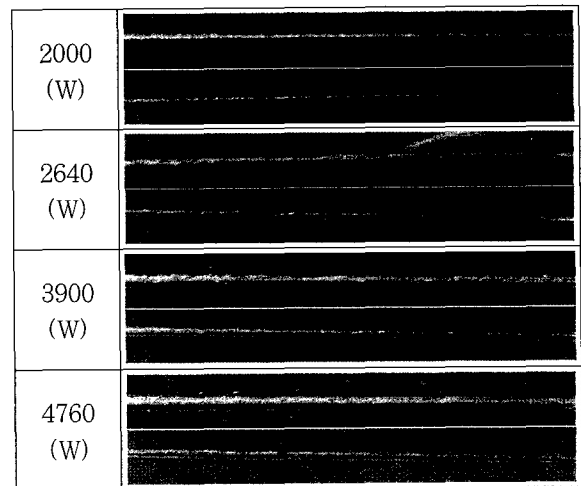


Fig. 8 Appearance of bead in hybrid welding

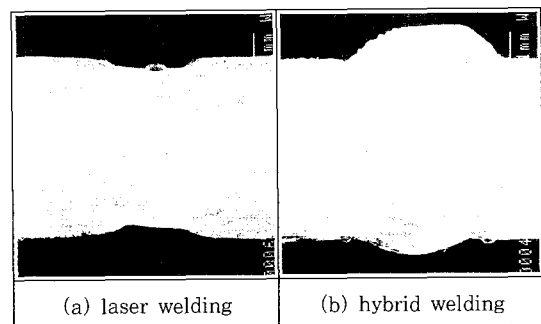


Fig. 9 Cut view of bead

몰되었다. 반면 하이브리드 용접의 경우에는 용접와이어에 의한 용융금속 보충으로 상부비드가 현저히 돌출되었다. 상부 비드폭은 레이저 단독용접에 비하여 넓었으나 시편 두께의 중앙부분 및 하부의 폭은 유사하였다. 용착금속은 용접와이어의 회석에 의하여 다소 차이가 있는 것으로 보인다.

3.2 하이브리드 용접부의 특성

Nd:YAG 레이저와 GMA의 하이브리드 용접에서는 용접와이어를 통한 용융금속 공급에 의하여 용접부의 성분 제어가 가능하다. 또한 용접의 용융잠열에 의하여 용접부의 냉각속도가 감소되어 균열발생이 억제된다. Fig. 10은 아크 용접, 레이저용접 및 하이브리드 용접부의 경도를 비교한 것이다. 모재는 두께 2.1mm의 Si 첨가 강이며 좌측의 검은색은 용접후 용접비드의 평균 비커스경도를 나타낸 것이며, 우측의 밝은 부분은 열처리 후의 용접부 경도를 나타낸 것이다. 레이저 단독용접에서는 급열 및 급냉에 의하여 용접부가 경화되었으나, 하이브리드 용접에서는 모재와 유사한 정도의 경도를 보였다. 열처리 후에는 템퍼링에 의하여 레이저 단독용접은 모재와 유사하였으나, 하이브리드 용접에서는 용접와이어에 의한 회석으로 인하여 경도가 모재보다 낮았다.

Fig. 11은 용접부의 인장특성을 나타낸 것이다. 레이저 단독용접과 하이브리드 용접부의 강도는 유사한 수준을 보였으나, 연신율은 하이브리드 용접부가 다소 우수하였다. 열처리 후에는 합금원소의 함량이 적은 용접와이어에 의한 회석으로 인하여 하이브리드 용접부가 레이저 단독용접부에 비하여 항복강도는 다소 낮았으나, 인장강도 및 연신율은 현저히 증가하였다.

용접부의 성형성을 비교하기 위하여 레이저 단독 및

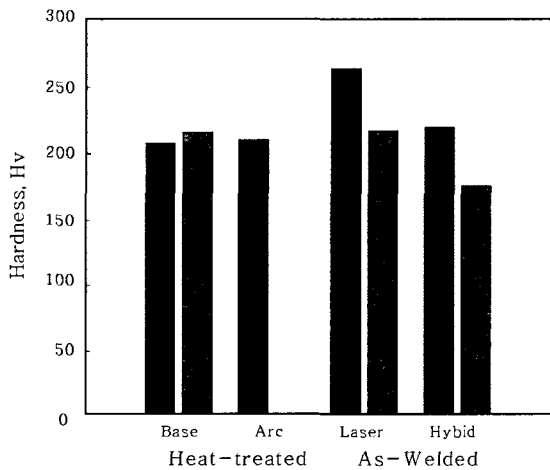


Fig. 10 Average Vickers hardness of weldment

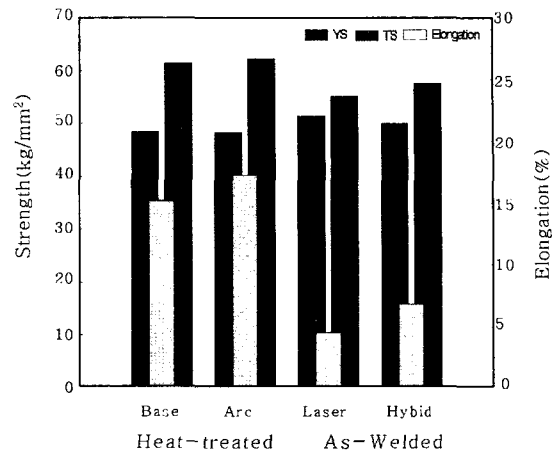


Fig. 11 Tensile properties of weldment

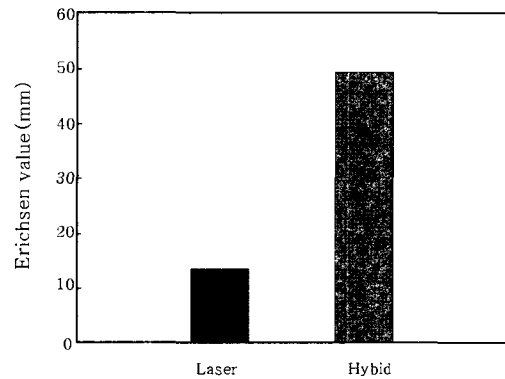


Fig. 12 Comparison of Erichsen value

하이브리드 용접부에 대하여 에릭슨 실험을 실시하였다. Fig. 12는 용접부 에릭슨 시험결과를 나타낸 것이다. 용접부 성형성 측면에서 레이저 단독용접에 비하여 하이브리드 용접은 우수한 특성을 보였다.

4. 결 론

Nd:YAG 레이저와 아크의 하이브리드 용접은 CO₂ 레이저에 비하여 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

1) 레이저 빔의 광섬유전송에 의하여 형상이 복잡한 3차원 형상의 용접에 적합하다.

2) 분위기 가스에 의한 플라즈마 발생이 거의 없고 플라즈마에 의한 레이저 빔의 흡수 혹은 산란이 적기 때문에 용접이 안정적이다.

3) 용접와이어를 사용하는 GMA의 하이브리드 용접에서는 용착금속의 성분제어가 가능하여 다량의 합금원소가 첨가된 고강도강에 유리하다함.

단점으로는 CO₂ 레이저에 비하여 발전기 가격이 고가이며, 최대 출력이 낮기 때문에 두께 5mm 이상의 소재에는 적용이 어렵다.

참 고 문 헌

1. C.Dawes : Laser Welding, McGraw - Hill, Inc., 1992, 16-30
2. C.V.Hyatt, K.H.Magee, J.F.Porter, V.E.Merchant and J.R.Matthews : Laser-assisted Gas Metal Arc Welding of 25-mm-thick HY-80 Plate, Welding Journal, July(2001), 163-172s
3. M.Eboo: Arc-augmented Laser Welding, Advances in Welding Processes, 4th Int. Conf. Harrogate, UK, May (1978), 257-2651
4. W.M.Steen and M.Eboo: Arc Augmented Laser Welding, Metal Construction, July (1979), 332-335
5. William M. Steen : Arc Augmented Laser Processing of Materials, J. Appl. Phys. 51-11, Nov. (1980), 5636-5641
6. W.W.Duley : Laser Welding, John Wiley & Sons, Inc., 1999, 10-24
7. T.Graf and H.Staufner : Laserhybrid Process and Volkswagen, IIW-Doc. XII-1730-02
8. P.L.Moore, E.R.Wallach and D.S.Howse : Development of Laser, and Laser/arc Hybrid Welding for Land Pipeline Applications, ICALEO 2003
9. E.Beyer, U.Dilthey, R.Imhoff, C.Maier, J.Neuenhahn and K.Behler : New Aspects in Laser Welding with an Increased Efficiency, ICALEO (1994), 183-192
10. E.Beyer : Survey of Laser Hybrid Processes, Laser 2001, Munich



- 이목영(李穆泳)
- 1965년생
- 포항산업과학연구원
- 하이브리드용접, 레이저용접, 아크용접
- e-mail: acceleee@rist.re.kr



- 권영각 (權寧珏)
- 1952년생
- 포항산업과학연구원
- 용접강도, 용접부파손해석, 부식 및 방식
- e-mail: ygkweon@rist.re.kr



- 김기철(金伎徹)
- 1948년생
- 포항산업과학연구원 설비·용접연구팀
- 고에너지 밀도 용접, 용접현상 해석 및 system 개발
- e-mail: kicholk@rist.re.kr