

600MPa급 TRIP강의 CO₂ 및 Nd:YAG 레이저 용접부의 특성

한대교* · 김성준* · 이봉근* · 김대업** · 강정윤*

*부산대학교 공과대학 재료공학과

**현대 모비스 기술연구소

Characteristics of CO₂ or Nd:YAG Laser Welded 600MPa Grade TRIP Steel

Tae-Kyo Han*, Seung-Jun Kim*, Bong-Keun Lee*, Dae-Up Kim** and Chung-Yun Kang*

*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Hyundai Mobis Technical Institute, Yongin 449-912, Korea

Abstract

The characteristics of CO₂ or Nd:YAG laser welded 600MPa grade TRIP steel was investigated. He or Ar gas was used as a shield gas in case of CO₂ laser welding, but the shield gas was not used in case of Nd:YAG laser welding. Bead on plate welding was performed with various welding conditions. Defects in the joints of both welding type occurred at 1.8m/min but were not observed over the welding speed of 2.1m/min in case of Nd:YAG laser welding. However, porosity occurred in CO₂ laser welding and the tendency of decreasing with the increase of welding speed. The hardness was the highest at heat affected zone near fusion zone as well as at the fusion zone and decreased on approaching the base metal. In a perpendicular tensile test to the weld line, all specimens that have been welded at optimum conditions were fractured at the base metal, and the tensile properties showed the rather higher than those of raw material. In a parallel tensile test, the strength of the joints was higher than that of the base metal. Elongation was found to be lower than that of the raw material. Forming height by Erichsen test and elongation were deeply related with the ratio of base metal/weld metal and the maximum hardness of the weld metal. Also porosity induced to decrease the strength and the elongation. The maximum formability was recorded at approximately 80% as compared with that of the raw material with the optimum condition.

* Corresponding author : tkhan00@naver.com

(Received September 6, 2005)

Key Words : Nd:YAG laser welding, CO₂ laser welding, TRIP steel, Maximum hardness, Microstructure, Mechanical property, Formability

1. 서 론

최근 전세계적인 에너지 및 환경규제 등의 문제가 대두되면서 자동차업계로 하여금 연비 및 배기가스를 감소시키도록 함으로서 자동차 중량은 감소되어야 한다. 반면 자동차의 안전성, 편의성 등 다양한 소비자의 욕구를 충족시키기 위해 안전 및 편의 부품을 자동차에 추가적으로 장착함으로써 자동차의 중량은 증가하는 추세에 있다. 따라서 이러한 상반되는 문제를 해결하기

위한 방안으로 기존 철강 소재에서 가벼운 비철합금 소재의 사용이 제안되고 있다. 제안되는 소재로는 마그네슘 합금, 알루미늄 합금, 플라스틱 등이 있으나, 아직까지 가격, 안전성, 내구성 등의 문제로 그 사용은 제한되고 있는 실정이다. 결국, 자동차구조용 소재는 안전성 및 내구성을 위해 높은 비강도와 자동차소재로 성형을 위한 높은 연성을 동시에 확보해야 한다. 철강업계에서는 이러한 시대적 흐름에 부응코자 소성변형동간의 잔류오스테나이트의 마르텐사이트로의 변형유기현상을 이용하여 고강도와 동시에 우수한 연성이 얻어지는

TRIP강(Transformation Induced Plasticity steel)의 개발이 이루어지면서, 자동차산업에의 적용의 폭을 증대시키고 있다¹⁻³⁾.

한편 레이저용접은 고밀도의 집속된 에너지를 열원으로 하는 광응용기술로서, 타 용접속도에 비해 용접속도가 빠르면서 입열량이 작아 열에 의한 변형이 작은 이점을 가지고 있고, 용접비드와 열영향부가 매우 좁아 접합이 어려운 형상이나 재료도 용접이 가능한 유연성을 가지고 있다^{4,5)}. 이런 특성으로 인해 최근 레이저 용접의 중요성이 확대되고 있으며, 현재 자동차생산기술의 선진화 대열에 있는 일본, 미국 등에서는 이미 레이저 용접기술을 도입하여 자동차 산업의 많은 부분에 응용을 도모하고 있는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

그러나 TRIP강의 레이저 용접에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 600MPa급 TRIP강의 레이저 용접기술에 대한 기초연구로서 CO₂ 및 Nd:YAG 레이저로 비드온 플레이트 용접하였을 때 용입특성 및 결합, 기계적 성질 및 성형성등의 용접부 특성에 대해 검토하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용한 재료는 화학조성이 0.08C- 1.5Mn- 1.0Si-Fe(wt%)이고, 인장강도가 약 600MPa인 두께 1.0mm 냉연 강판을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 레이저 용접 장치는 최대출력이 6kW인 독일 TRUMPF사(TLF6000 turbo)의 CO₂ 레이저 장치와 최대출력 4kW인 동일사의 Nd:YAG 레이저 장치를 사용하였다. CO₂ 레이저 용접은 출력 6kW, Nd:YAG 레이저 용접은 3.5kW에서 모재를 50(W)×200(L) 크기로 절단한 후 압연방향으로 비드용접을 실시하였다. 보호가스는 CO₂ 레이저 용접의 경우 Ar가스, He가스를 사용하였고, 유량은 선행 실험에서 최적조건인 20 l/min으로 하였다. Nd:YAG 레이저 용접의 경우 보호가스는 사용하지 않았다. 용접부의 매크로조직은 2% -Nital로 상온에서 10초간 부식시켜 실체현미경으로 관찰하였고, 용접부 미세조직은 광학현미경과 주사식전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 기공율은 현미경 영상분석장치(Image analyzer)를 이용하여 전체면적에 대한 기공면적의 비율로 측정하여 정량화하였다. 비드단면의 경도는 미소경도기를 사용하여 하중 2.94N, 하중유지시간을 15초로 하여 측정하였다. 인장시험은 박판재의 인장시험에 적합한 JIS 5호 시험편으로 용접선에 수직인 방향과 수평인 방향으로 가공하여 인장속도 5mm/min

의 조건으로 신율계(extensormeter)를 부착하여 측정하였다. 성형성 평가를 위해 Erichsen 시험을 실시하였는데, 시험편의 규격은 Erichsen 2호로, 펀치의 상승속도는 7mm/min로 설정하였고, 장치는 박판만능시험기(Universal Sheet Testing Machine : J.T.toshi)를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용입 특성

Fig. 1에 Nd:YAG 레이저 용접부와 보호가스를 달린 CO₂ 레이저 용접부를 나타낸다. CO₂ 레이저 용접의 경우 보호가스를 사용하지 않았을 때는 모든 용접 조건에서 용접부의 전반에 걸쳐 기공이 발생하여 양호한 비드를 얻을 수 없었다. 따라서 CO₂ 레이저 용접의 경우에는 Ar 및 He를 보호가스로 사용하여 용접부의 특성을 조사하였다. 반면, Nd:YAG 레이저 용접의 경우에는 보호가스를 사용하지 않은 경우에도 양호한 비드가 얻어졌다. 따라서 Nd:YAG 레이저 용접의 경우에는 보호가스를 사용하지 않은 용접부에 대해 특성을 조사하였다.

Fig. 2는 용접속도에 따른 Nd:YAG 레이저(3.5kW) 용접부 횡단면과 보호가스로서 He 및 Ar을 사용한 CO₂ 레이저(6kW) 용접부 횡단면을 보여준다. 완전용입이 일어나는 최대용접속도는 Nd:YAG레이저 용접의 경우 6.0m/min, He를 보호가스로 사용한 CO₂ 레이저 용접의 경우 12m/min였고, Ar을 사용한 경우는

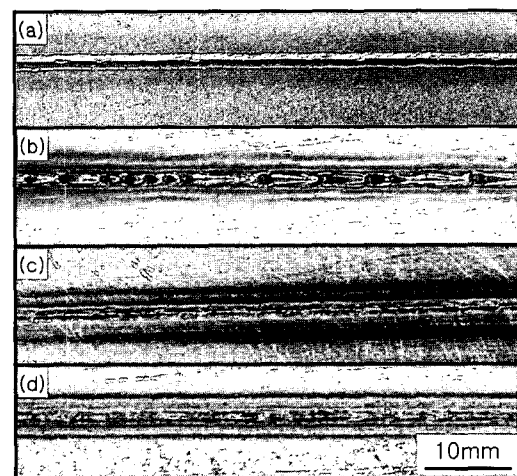


Fig. 1 Bead with different welding condition : (a)Nd:YAG-4.8m/min, (b)CO₂-non shield-7m/min, (c)CO₂-Ar-7m/min, (d)CO₂-He-7m/min

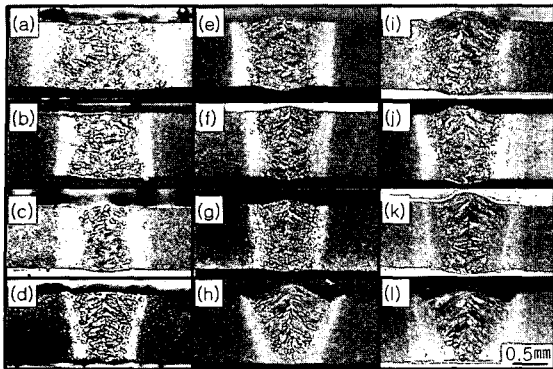


Fig. 2 Representative cross-sections of beads with various welding conditions :
 (a)Nd:YAG-2.1m/min, (b)Nd:YAG-3.0m/min,
 (c)Nd:YAG-6.0m/min, (d)Nd:YAG-7.2m/min,
 (e)CO₂-He-4.0m/min, (f)CO₂-He-7.0m/min,
 (g)CO₂-He-9.0m/min, (h)CO₂-He-130m/min,
 (i)CO₂-Ar-5.0m/min, (j)CO₂-Ar-7.0m/min,
 (k)CO₂-Ar-9.0m/min, (l)CO₂-Ar-12m/min

11m/min로서, He의 경우가 더 높은 속도까지 완전용입이 일어났다. 용접속도에 따라 용접부 비드의 형상이 변화하고 있음을 볼 수 있는데, Nd:YAG 레이저 용접의 경우 저속도에서는 상부의 폭이 하부의 폭보다 좁은 사다리꼴 모양에서 용접속도가 증가함에 따라 완전용입이 일어나는 용접속도구간에서는 용접속도가 증가할수록 전체적인 비드의 폭이 감소하면서 그 모양도 I자 형상을 거쳐 불완전 용입이 일어나는 속도에서는 V자 형상을 나타내었다. 특히 (d)의 경우 (c)보다 비드폭이 넓은데, 이것은 7.2m/min의 용접속도(d)에서 완전용입은 국부적으로만 발생하는 속도(그림은 완전용입이 일어난 부분)이기 때문으로 생각된다. 즉 입열량이 완전용입을 일으키기에 부족하기 때문에 비드의 상부에서 열원의 이동이 좌우 방향으로 집중적으로 일어남으로서 완전용입이 일어나는 (c)보다 비드폭이 넓은 것으로 생각된다. 반면 CO₂ 레이저 용접의 경우 보호가스와는 무관하게 저속도의 X자 형상에서 용접속도의 증가와 더불어 I자 형상을 거쳐 불완전 용입이 발생하는 속도에서는 Nd:YAG 레이저 용접부와 동일하게 V자 형상을 나타내었다. 또한 CO₂ 레이저 용접에서 같은 용접속도에서는 He를 보호가스로 사용한 경우가 Ar의 경우보다 비드의 폭이 다소 좁게 나타났다. 불완전용입이 일어나는 용접속도에서는 용접비드에 약간의 언더컷이 관찰되며, Nd:YAG 레이저 용접부 비드가 CO₂ 레이저 용접부 비드에 비해 상부 및 하부의 튀어나옴 현상 즉 과잉 용접금속(excess weld metal) 및 과잉 용입(excess penetration)현상이 작게 나타났다.

3.2 용접부 결함

용접부 내부의 결함 유무를 살펴본 결과, Nd:YAG 레이저 용접의 경우에는 결함이 관찰되지 않았고, CO₂ 레이저 용접의 경우에도 기공이외의 결함은 관찰되지 않았다. 보고된 바로도 탄소량 0.2%이하의 강을 CO₂ 레이저 용접할 경우 기공이외의 결함은 발생하지 않는다고 알려져 있다^{7,8)}. Fig. 3은 용접조건에 따른 용접부의 종단면을 대표적으로 나타낸 것이다. Nd:YAG 레이저 용접부의 경우 기공이 전혀 관찰되지 않는 반면, CO₂ 레이저 용접부의 경우 보호가스로 Ar을 사용한 경우 다량의 기공이 관찰된다. 기공의 형상은 비드의 아래쪽에 위치한 크기가 비교적 작은 구형의 것과 비드 상부에 위치하는 큰 것들은 구형의 것이 여러개 합쳐져 뿔뿔의 형태를 띄고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 용접조건에 따른 기공 분율을 영상분석법으로 측정하여 나타낸 것이다. Nd:YAG 레이저 용접의 경우에는 전 용접속도에서 기공이 발생하지 않았다. Ar을 보호가스로 사용한 CO₂ 레이저 용접의 경우 용접속도 5m/min에서 최고값을 나타낸 후 용접속도와 증가할수록 다소 감소하지만, 완전용입이 일어나는 전 용접

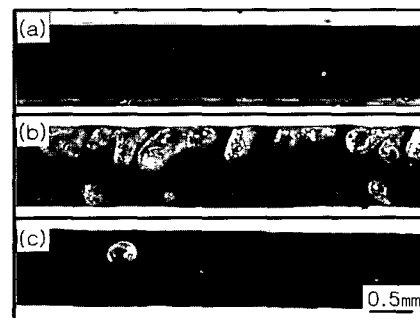


Fig. 3 Longitudinal sections with different welding condition:(a)Nd:YAG-4.8m/min, (b)CO₂-Ar-5m/min, (c)CO₂-He-4m/min

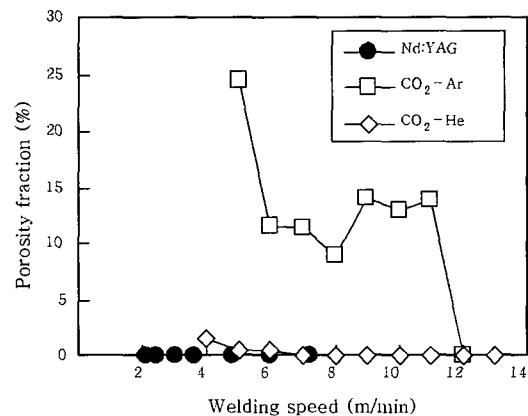


Fig. 4 Effect of welding condition on porosity fraction

속도에서는 기공율이 10%이상으로 큰 값을 나타내고 있다. 반면 He을 보호가스로 사용한 CO₂ 레이저 용접의 경우 용접속도 4m/min에서 최고값인 1.5%를 나타낸 후 용접속도가 증가함에 따라 감소하여, 용접속도 7m/min이상에서는 기공이 거의 관찰되지 않았다.

CO₂ 레이저 용접의 경우 보호가스에 따라 정도의 차이는 있지만, 저속 용접에서 기공이 다량 존재하고, 용접속도가 증가함에 따라 기공율이 감소하는 이유를 고찰하면 다음과 같다. 강의 레이저 용접에서 용접속도에 따른 기공발생을 X-Ray 분석한 Matsunawa의 연구 결과에 의하면⁹⁾, 저속도의 용접에서는 용융금속이 응고벽면을 따라서 후면으로 긴 거리를 이동하게 되며, 이때 최초 키흔 선단부에서 발생한 기포도 용융금속의 이동과 함께 응고벽면을 따라 긴 거리를 이동하게 된다. 따라서 용융금속이 응고하는 동안에 기공이 외부로 빠져나가지 못하고 갇히기 쉽기 때문에 기공이 발생할 가능성이 높다. 반면 고속 용접에서는 용융금속이 직상방향으로 이동하고, 레이저 빔 선단에서 발생한 기포도 직상방향으로 키흔에 따라서 짧은 시간에 외부로 분출되기 때문에, 기공이 거의 발생하지 않은 것으로 보고 되어 있다.

3.3 용접부의 경도와 미세조직

Fig. 5는 용접속도 2.1m/min와 6.0m/min의 Nd:YAG 레이저 용접부와 용접속도 7m/min의 Ar과 He을 보호가스로 사용한 CO₂ 레이저 용접부에 대해 용접부중심선을 기준으로 150 μ m간격으로 비커스 미소경도를 측정하여 정리한 것이다. 용접부의 경도분포를 살펴보면, 전 조건에서 용접금속과 용접금속에 인접한 열영향부에서 최대경도를 나타내다가, 모재쪽으로 갈수록

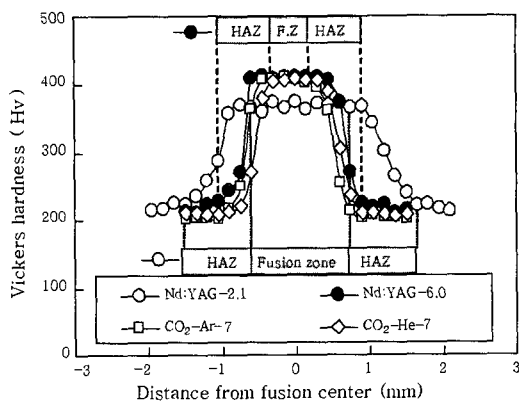


Fig. 5 Hardness distributions with several welding conditions

경도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 용접금속의 최대경도는 용접속도 6.0m/min의 Nd:YAG 레이저 용접부와 Ar과 He을 보호가스로 사용한 CO₂ 레이저 용접부의 경우 거의 동일하지만, 용접속도 2.1m/min의 Nd:YAG레이저 용접부의 경우에는 그 값이 타 조건에 비해 감소한 것을 볼 수 있다.

시험한 모든 용접속도의 경도분포는 모두 유사한 경향을 나타내었으므로, 용접속도에 따른 최대경도변화만을 조사하여 보았다. 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 CO₂ 레이저 용접의 경우 전 용접속도에서 최대경도는 거의 동일하다. 반면, Nd:YAG 레이저 용접의 경우 용접속도 2.1m/min에서 최소값을 나타내다가 용접속도가 증가함에 따라 증가하고, 용접속도 3.6이상에서는 동일하게 나타났다. 그림에서 점선은 1223K로 고주파로 급속가열 후 수냉한 시편의 경도값을 나타낸다. 수냉시편의 최대경도가 용접부의 것보다 조금 높은 것을 알 수 있다. 이 사실은 저속의 레이저용접에서 냉각속도는 수냉 시의 냉각속도와 동일하거나, 느리다라는 것을 의미한다.

Fig. 7은 상기와 같은 경도특성을 나타내는 이유를 알아보기 위하여, Nd:YAG 레이저로 용접속도 2.1m/min과 6.0m/min로 용접한 용접부에 대해 용접금속, 용접금속에 인접한 열영향부, 열영향부 중심, 모재에 대한 SEM조직을 나타낸 것이다. CO₂ 레이저 용접부는 용접속도 6.0m/min의 Nd:YAG 레이저 용접부와 거의 동일하여 사진을 생략하였다. 우선 용접속도 6.0m/min의 것을 살펴보면, 용접금속은 페라이트와 급랭조직이 관찰된다. 용접금속에 인접한 열영향부에서는 용접금속에 비해 상대적으로 작은 크기의 급랭조직과 페라이트가 관찰된다. 열영향부에서는 급랭조직과 다량의 페라이트가 관찰된다.

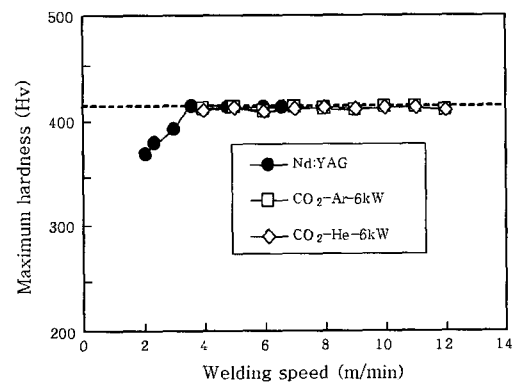


Fig. 6 Change of the maximum hardness with welding condition

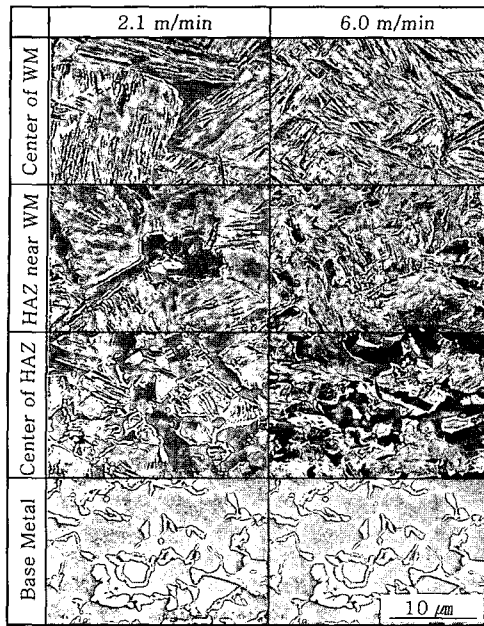


Fig. 7 Comparison of SEM microstructures with each region between 2 Nd:YAG laser welded joints with different welding speed

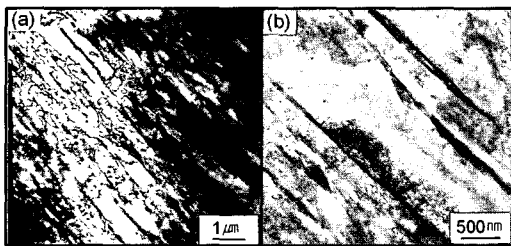


Fig. 8 TEM microstructures of weld metal with a welding speed of 6.0m/min

Fig. 8은 용접부에서 관찰되는 급랭조직이 어떤 상인지를 알아보기 위하여 TEM을 이용하여 관찰한 사진이다. (a)에서 마르텐사이트와 (b)의 상부베이나이트로 구성되어 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 용융부에서 최대경도가 얻어지는 것은 베이나이트와 마르텐사이트로 구성되어 있기 때문이며, 모재 쪽으로 갈수록 경도가 감소하는 것은 베이나이트의 감소와 더불어 페라이트 양의 증가에 기인한 것임을 알 수 있다.

용접속도 2.1m/min의 것은 6.0m/min의 것과 동일한 상으로 구성되어 있지만, 용접속도의 페라이트가 조대한 입계 페라이트이고, 그 양도 많다. 이것으로부터 용접속도가 낮은 2.1m/min는 냉각속도가 느려 페라이트가 많이 형성되어, 경도가 낮아진 것으로 생각된다.

3.4 용접부의 인장성질

Fig. 9는 용접선에 수직하게 인장시험 한 경우, 용접

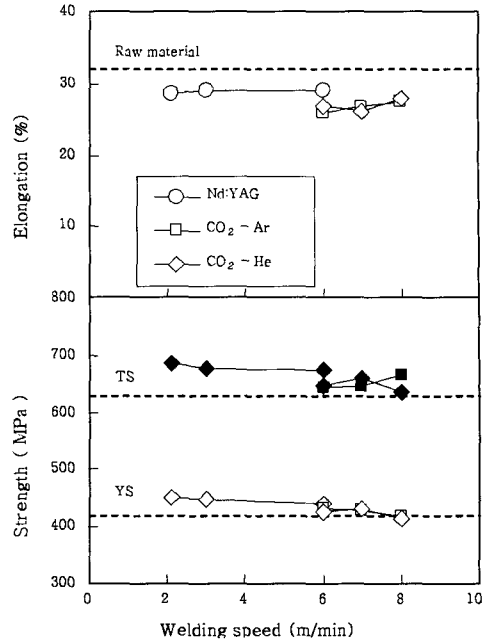


Fig. 9 Perpendicular tensile properties with various welding conditions

법과 용접조건에 따른 인장성질을 나타낸다. 항복강도, 인장강도는 모든 용접조건에서 모재의 것과 거의 같거나 조금 높게 나타난 반면, 연신율은 모재의 것보다 낮게 나타난다. 항복강도 및 인장강도는 용접금속의 경도 상승에 의한 것으로 생각되어지며, 연신율은 용접금속의 Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 용접부의 소성구속에 의해 다소 감소한 것으로 생각된다.

한편, 용접선에 평행하게 인장시험 한 경우, Fig. 10(b)에서 볼 수 있듯이 시험편의 상하의 것이 모두 컵 형태로 파단이 발생하였고, 모재부와 용접부의 연신 길이가 달랐다. 그래서 용접부와 모재부의 연신율을 각각 측정하였다. Fig. 11은 용접선에 평행하게 인장시험 한 경우, 용접법과 용접조건에 따른 인장성질을 나타낸 것이다. 수직인장의 경우와 같이, 강도는 모든 용접조건에서 모재보다 큰 값을 나타내고, 연신율은 모재보다 작은 값을 나타낸다. Nd:YAG 레이저 용접부의 경우 저속도구간에서 다소 높은 강도값을 나타내다가 용접속도가 증가함에 따라 조금 감소하였으며, 용접속도 3.6m/min이상에서 조금 상승하였다. 연신율은 강

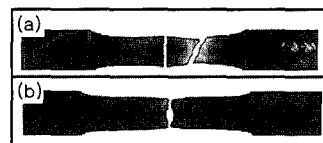


Fig. 10 Specimen appearance after tensile test : (a) perpendicular tensile test to load axis, (b) parallel tensile test

도와는 반대경향을 나타냈다. CO₂ 레이저 용접부의 경우 He를 보호가스로 사용하였을 때는 용접속도가 증가할수록 강도는 감소하였고, 연신율은 상승하였다. 반면, Ar을 보호가스로 사용한 경우에는 강도 및 연신율 모두 He를 보호가스로 사용한 경우보다 매우 작게 나타났고, 용접속도가 증가함에 따라 강도는 조금 증가한 반면 연신율은 다소 감소하였다.

모재와 용접부의 연신율이 다르게 나타나는 이유를 알아보기 위하여, 인장시험 동안에 시험편 형상 변화와 하중-연신율 곡선과의 관계를 관찰하여 보았다. Fig. 12는 Ar을 보호가스로 용접한 시험편의 형상 변화를 촬영한 것과 이에 대응하는 하중-연신 곡선을 나타낸 것이다. 인장초기에는 항복점을 지나 원소재와 같이 시험편 전체가 균일연신을 하다가, A에서 necking이 발생하고 (a), B에 도달하면, 비드부에서 균열이 발생하고(b), 균열이 성장하면서, 실제단면적이 감소함에 따라 하중

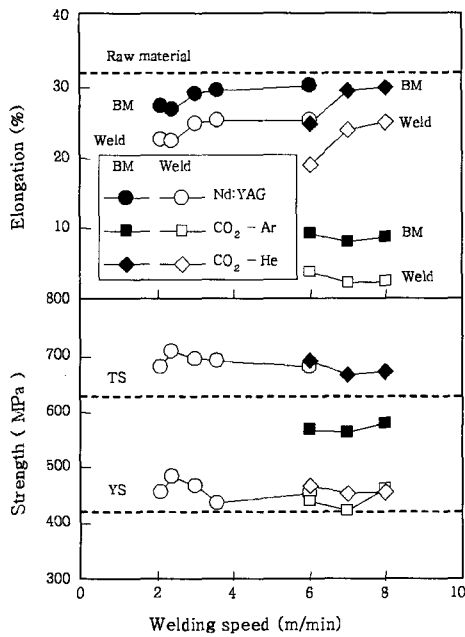


Fig. 11 Parallel tensile properties with various welding conditions

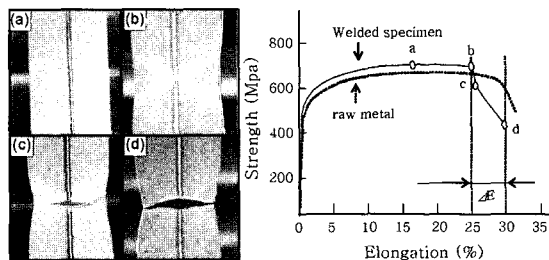


Fig. 12 Change of specimen shape during parallel tensile test and the corresponding strength-elongation curve

도 저하하지만, 모재부는 계속해서 연신된다(c). 결국 D에서 최종 파단이 일어나게 된다(d). 이상의 결과를 요약하면 비드부에서 우선적으로 파단이 일어나고, 비드부에서 발생한 균열이 성장하는 동안에도 모재부는 계속해서 연신되어 최종 파단이 일어나기 때문에 모재부와 비드부의 연신율의 차, ΔE가 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 용접속도 6m/min에서 Ar을 보호가스로 한 CO₂ 레이저 용접부 인장시험 파단면을 나타낸다. 용접부의 상부에 인장시험동안 연신된 기공(a,b)과, 모재부(c)에서는 연성파면을 나타내는 덩플, 그리고 용접부 기공 아래쪽의 취성파면인 벽개파면(d)이 관찰된다. 이상의 결과로부터 용접부는 모재부에 비해 취성적인 파괴를 나타내며, 특히 기공을 함유하는 경우 기공이 일종의 노치현상을 야기함으로써 기공을 갖지 않는 용접부보다 상대적으로 더 적은 소성변형 후 파괴에 이르며, 이것이 연신율의 감소를 가져오는 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 용접부를 포함한 시험편의 강도는 용접금속의 경도상승에 의해 전 용접조건에서 증가하며, 기공은 강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 연신율은 전 조건에서 모재보다 낮은 값을 나타내는데, 이것은 용접금속에서 균열이 먼저 발생하기 때문에 모재보다 낮은 값을 갖는 것으로 생각된다. 또한, CO₂ 레이저 용접시의 보호가스에 따른 연신율을 살펴보면 보호가스로 Ar을 사용하는 경우 발생하는 다량의 기공에 의해 He의 경우보다 상당히 낮은 값을 나타내며, He의 경우에도 용접속도 6m/min에서는 기공을 소량 포함하기 때문에 타 용접속도보다 낮은 연신율

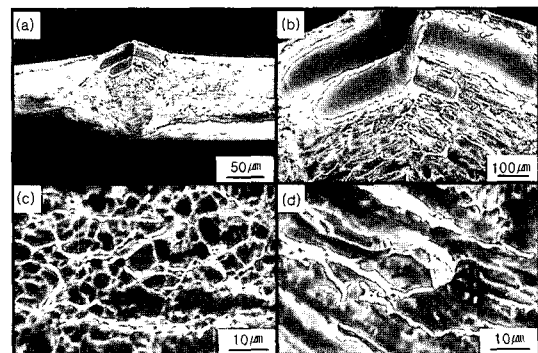


Fig. 13 SEM fractography of CO₂ laser welded joint with a welding speed of 6m/min under Ar shield gas: (a)low magnified fractured joint, (b)enlarged area including porosities of (a), (c)high magnified fractured base metal region, (d)high magnified fractured weld metal region

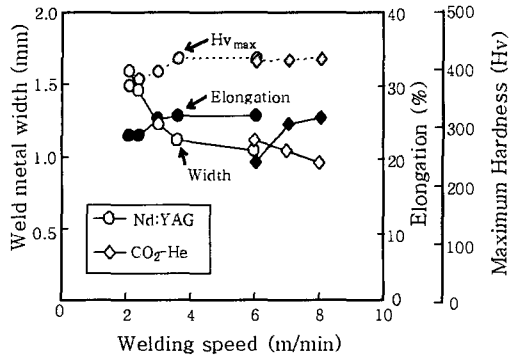


Fig. 14 Correlation among the width of weld metal, elongation and the maximum hardness

을 보이는 것을 알 수 있다. 한편 Nd:YAG 레이저 용접의 경우 저속도에서는 고속도에 비해 최대경도는 낮지만, 비드폭이 넓기 때문에 연신율이 감소한 것을 알 수 있다.

Nd:YAG와 CO₂ 레이저 용접의 연신율을 상호비교하면, Nd:YAG의 저속도에서는 CO₂의 것보다 낮은 연신율을 나타내지만, 3.0m/min 이상에서는 CO₂의 것과 거의 유사한 연신율을 나타낸다. 이것은 Fig. 14에 나타낸 용접방법 및 용접속도에 따른 용접금속의 비드폭, 최대경도, 연신율의 변화에서 볼 수 있듯이 저속도에서의 최대경도는 고속도에 비해 낮지만, 고속도보다 넓은 비드폭에 의해 연신율이 감소하는 반면, 3.0m/min 이상에서는 비드폭이 CO₂의 것과 비슷하기 때문에 유사한 연신율을 갖는 것으로 생각된다.

3.5 용접부의 성형성

실제 생산공정에 적용되는 가공은 인장시험과 같은 단축이 아닌 복잡한 다축응력을 받게 되므로 성형성을 평가하기에는 인장시험만으로는 부족하다. 따라서 다축응력시험인 Erichsen 시험으로 성형성을 평가하였다. Fig. 15는 용접조건에 따른 성형높이를 나타낸 것이다. 이 시험에서도 균열은 평행 인장시험과 동일하게 비드부에서 발생하였다. 그러므로 성형성은 수평인장시험의 연신율과 거의 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

자동차 경량화를 위한 600MPa급 TRIP강을 Nd:YAG 및 CO₂ 레이저로 비드용접하였을 때, 용입특성, 결합, 기계적 성질 및 성형성 등의 용접부 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

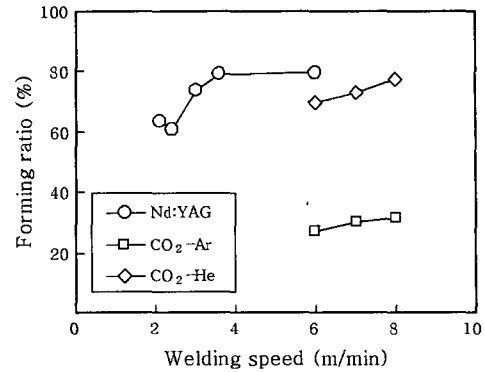


Fig. 15 Effect of welding condition on forming height of Erichsen test

1) 완전용입이 일어나는 최대용접속도는 출력 3.5kW Nd:YAG 레이저 용접의 경우 6.0m/min, 6kW CO₂ 레이저 용접의 경우 Ar을 보호가스로 사용하였을 때는 11m/min, He의 경우는 12m/min였다.

2) Nd:YAG 레이저 용접부에는 기공이 관찰되지 않았고, CO₂ 레이저 용접부에는 기공이 존재하였다. Ar을 보호가스로 사용한 경우에는 완전용입이 일어나는 전 용접속도구간에서 10%이상의 값을 나타낸 반면, He을 사용한 경우는 1.5%미만을 나타냈으며, 용접속도가 증가할수록 감소하였다.

3) 경도분포는 모든 조건에서 용접금속과 용접금속에 인접한 열영향부에서 최대경도를 나타내고, 모재쪽으로 갈수록 감소하였으며, 최대경도는 Nd:YAG 레이저 용접부에서는 3.6m/min까지 증가한 후, 그 이상의 용접속도에서 동일하였으며, CO₂ 레이저 용접부는 주어진 범위 내의 용접속도에 무관하게 동일하였다.

4) 용접선에 수직하게 인장하였을 때는 강도는 모재의 것보다 조금 크게, 연신율은 다소 낮게 나타났다.

5) 용접선에 수평하게 인장하였을 때의 강도는 용접방법 및 용접조건과 무관하게 전 용접조건에서 모재보다 높게 나타나며, 연신율은 낮게 나타났다. 기공은 강도에는 영향을 미치지 않는 반면, 연신율을 크게 감소시켰다. 용접방법에 따른 연신율은 Ar을 보호가스로 한 CO₂ < 저속도의 Nd:YAG < He을 보호가스로 한 CO₂ ≈ 고속도의 Nd:YAG의 순으로 나타났다.

6) 성형성은 수평인장시험의 연신율의 결과와 동일한 경향으로 나타났다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R05-2003-000-11698-0).

참 고 문 헌

1. K. I. Sugimoto, N. Ushi, M. Kobayashi and S. I. Hashimoto : ISIJ Inter. 32 (1992), 1311
2. H. C. Chen, H. Era and M. Shimizu : Metall. Trans. 20A (1989), 437
3. S. K. Kim, H. C. Chen, J. H. Chung and Y. W. Chang : J. Kor. Inst. of Met. & Mater. 36(1998), 151
4. J. K. Kristensen : *Potential and challengers in laser welding structural steels* (The industrial laser hand book, 1993)
5. C. M. Banas : *The industrial Laser Annual Handbook* (Tulsa, Pennwell Publications, 1986)
6. J. Suh and Y. H. Han : J. KWS 12 (1994), 49 (in Korean)
7. Tae-Kyo HAN et al : ISIJ, 45-1(2005), 60
8. Tae-Kyo Han, Bong-Keun Lee and Chung Yun Kang : J.KSLP, 7-2 (2004), 2, 19
9. Katayama : J. JWS 19-1 (2001), 213