

# 600MPa급 자동차용 석출경화형 고장력강판 Nd:YAG 레이저 용접부의 특성에 미치는 용접속도의 영향

한태교\* · 정병훈\*\* · 강정윤\*\*\*

\*포스코

\*\*성우하이텍

\*\*\*부산대학교 공과대학 재료공학과

## Effect of the welding speed on the characteristics of Nd:YAG laser welds for automotive application : 600MPa PH high strength steel

Tae-Kyo Han\*, Byung-Hun Jung\*\* and Chung-Yun Kang\*\*\*

\*POSCO Ltd., Pohang 709-785, Korea

\*\*SUNGWOO HITEC, Pusan 619-961, Korea

\*\*\*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

### Abstract

The effect of welding speed on the weldability, microstructures, hardness, tensile property of Nd:YAG laser welding joint in 600MPa grade precipitation hardening high strength steel was investigated. A shielding gas was not used, and bead-on-plate welding was performed using various welding speeds at a power of 3.5kW.

Porosity in the joints occurred at 1.8m/min, but were not observed over the welding speed of 2.1m/min. However, spatter occurred over the welding speed of 6.6m/min. The hardness was the highest at heat affected zone(HAZ) near fusion zone(FZ), and was decreased on approaching to the base metal. The maximum hardness increased with increasing welding speed. The microstructure of FZ was composed of coarse grain boundary ferrite and bainite(upper) but the HAZ near the FZ contained bainite(Lower) and fine ferrite at a low welding speed. With increasing welding speed, ferrite at the FZ and the HAZ became finely and upper bainite changed to lower bainite. In a perpendicular tensile test to the weld line, all specimens were fractured at the base metal, and the tensile strength and the yield strength of joints was equal to those of raw material. Elongation was found to be lower than that of the raw material.

**Key words** : Precipitation Hardening High Strength Steel, Nd:YAG Laser, Welding Speed, Weldability, Microstructures, Hardness, Tensile Property

## 1. 서 론

자동차의 연비 향상을 위한 경량화와 안전성, 편의성 등 다양한 소비자의 욕구를 충족시키기 위해, 최근 높은 강도와 더불어 연신율 및 성형성이 우수한 새로운 자동차용 고장력 박강판이 개발되고 있다. 이 중에서도 상변태를 이용한 TRIP 강과 DP 강을 비롯하여 미세한 석출물을 생성시켜 전위의 이동을 방해함으로써 강도를 향상시킨 석출경화형 강과 같은 500MPa급 이상의 첨단고장력강(AHSS : advanced high strength steel)들은 차세대 자동차용 소재로 매우 각광을 받고 있다<sup>1,4)</sup>.

한편 레이저용접법은 용접속도가 빠르면서 입열량이 적어 용접비드와 열영향부가 매우 좁을 뿐만 아니라, 열변형도 매우 적다<sup>5,6)</sup>. 이런 장점 때문에 현재 선진국인 독일, 일본 등에서는 이미 자동차 조립기술로서 도입하여 실용화하고 있다<sup>7)</sup>.

500MPa급 이상인 첨단고장력강의 용접에 관한 국내의 연구는 아주 적은 편이며, 연구가 미진한 실정이다. 특히, 이들 강들은 성분제어 혹은 열처리/냉각 제어를 통해 제조되었기 때문에, 레이저 용접부는 이들 구성상이 파괴될 것으로 예상되므로, 레이저 용접조건에 따른 용접부의 미세조직을 체계적으로 검토하고, 상변태 거동을 파악하여 경화기구를 규명할 필요가 있다. 또한 용접부의 미세조직의 변화와 폭에 따른 인장성질 및 성형성에 미치는 영향을 체계적으로 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 차체경량화 재료 중에서 주로 멤버(Member)와 보강재로 사용될 600MPa급 석출경화형 강의 레이저 용접기술에 대

한 기초연구로서, 용접성, 용입현상, 용접부의 미세조직 및 경도, 인장성질에 미치는 용접속도의 영향을 검토하고자 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 600MPa급 냉연 석출경화형 강판( $t : 1.2\text{mm}$ )을 모재로 사용하였으며, 그 화학 조성(wt%)은  $0.08\%C-1.5\%Mn-0.5\%Si-0.04\%Ti-Fe$ 이다.

레이저용접은 Nd:YAG 레이저용접기(TRUMPF, Max power 4kW)를 사용하였고, 출력을 3.5kW로 일정하게 하고, 용접속도를 변화시켜 소재의 압연방향으로 비드언플레이트용접 하였다. 용접시험편은  $50(W) \times 200(L)$  크기로 하였고, 보호가스는 사용하지 않았다.

용접부의 매크로조직은 2%-Nital로 상에서 10초간 부식시켜 실체현미경으로 관찰하였고, 용접부 미세조직은 광학현미경과 주사식전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 경도는 미소경도기를 사용하여 하중 2.94N, 유지시간을 15초로 하여 측정하였다. 인장시험은 박판재의 인장시험에 적합한 KS 5호 시험편으로 용접선에 수직인 방향으로 가공하여 인장속도 5mm/min의 조건으로 신율계(extensormeter)를 부착하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 결함과 비드형상

Fig. 1은 비드의 표면과 횡단면내에 대표

적인 결함을 분류한 것으로, 결함은 기공과 스패터로 분류되었다. Table 1은 용접속도 변화에 따른 표면결함의 존재 유무를 조사하여 정리한 것이다. 저속도 1.8m/min에서는 기공이 발생하고, 6.6m/min 이상의 고속도에서는 스패터가 발생하는 것을 볼 수 있다. 특히 저속도에서 기공이 발생하는 것은 과대한 입열로 Mn과 같은 증기압이 높은 금속이 다량으로 증발하여 플라즈마를 형성하고, 이로 인하여 레이저빔의 효율이 불안정하게 됨으로써, 불규칙적인 용융현상이 일어나기 때문에 기공이 다량 발생한 것으로 생각된다. 그러나 용접속도 2.1m/min ~6.0m/min 범위에서는 레이저빔이 안정하여 결함이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 용접조건에 따른 비드의 단면을 나타낸 것이고, Fig. 3은 비드 단면 변화를 모식적으로 나타낸 것이다. 용접속도에 따른 비드형상 변화를 보면, 저속도의 비드들은 상부의 폭이 하부의 폭보다 좁은 사다리꼴 형상((a), (b))이지만, 용접속도가 증가함에 따라 전반적으로 비드의 폭이 감소하면서 상하 폭이 비슷한 X자 혹은 I자 형상 형

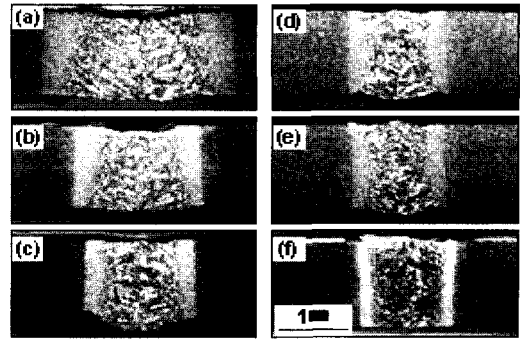


Fig. 2 Cross sections of the bead with the welding speed (a) 2.1, (b) 3.0, (c) 3.6, (d) 4.8, (e) 6.0, (f) 7.2m/min

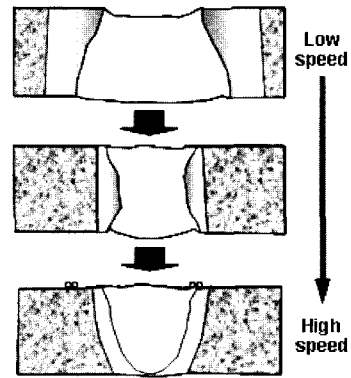


Fig. 3 Schematics diagram of the bead with the welding speed

W.S	Surface		Longitudinal section of bead	
1.8 m/min				
4.8 m/min				
6.6 m/min				

Fig 1 Defects at the surface and longitudinal section of the bead with the welding speed

Table 1 Defects at the bead surface the welding speed

W.S.(m/min)	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2
6.6Defect	P	G	G	G	G	G	G	G	G	S	S

P: Porosity G : Good S : Spatter

상으로 변화하는 경향을 보이고 있다. 한편 용접속도가 빠른 7.2m/min(d)의 경우는 부위에 따라 완전용입/불완전용입 현상이 나타났다. 여기서 특히 저속의 용접속도에서 상부보다 하부의 비드 폭이 넓은 이유를 고찰하면 다음과 같다. 일반적으로 레이저 용접은 키홀(Keyhole)현상에 의해 좁고 깊은 용입(penetration)을 얻을 수 있다는 것이 특징이고, 장점이다. 한편 키홀 현상은 용접 조건에 따라서 용입모드가 변화하는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 즉 저속의 용접속도와 고출력의 용접조건에서는 재료 표면에 조사되는 레이저빔의 에너지 밀도가 높기 때문에 완전한 키홀 현상이 발생하고, 키홀 윗부분이 경사면을 이루어져 있으므로, 키홀 내부로 입사한 빔이 반사되는 월 포커싱효과(Wall focussing effect)에 의해 키홀 아랫부분이 추가적으로 용융됨으로써 상부보다 하부의 폭이 넓은 사다리꼴 형상을 나타낸다. 이러한 용입현상을 “열린 키홀용입 모드(open keyhole penetration mode)”라고 한다. 반면에 고속 용접속도 조건에서는 표면에 조사되는 레이저빔의 에너지 밀도가 낮아서 상부는 키홀 현상이 발생하지만, 하부의 미용융 부분은 반사 레이저빔만에 의해 용융되므로 상부보다 하부 폭이 좁은 역삼각형의 비드 형상이 얻어지는 용입 모드를 “닫힌 키홀용입 모드(closed keyhole penetration mode)”라고 한다. 한편 중간 정도의 용접속도에서는 상부와 하부의 폭이 비슷한 X(or I)자 형태를 나타낸다.

### 3.2 용접부의 경도와 미세조직

Fig. 4는 원소재의 광학현미경 및 SEM 조직이다. 조직은 페라이트(F) 기지에, 펄라이트(P)와 미세한 TiC 석출물(화살표)로 구성되어 있으며, TiC 석출물은 페라이트 핵생성 사이트로 작용하여 페라이트 결정입도를 미세화 시키고, 전위의 이동을 방해함으로써 강도를 향상시키는 역할을 한다.

Fig. 5는 용접속도 6.0m/min의 조건으로 레이저 용접한 시편에 대하여 용융부 중심으로부터 모재까지 연속 촬영한 광학현미경 조직을 나타낸 것이고, 여기에 대응하는 경도분포를 Fig. 6에 나타낸다. 경도는 미소

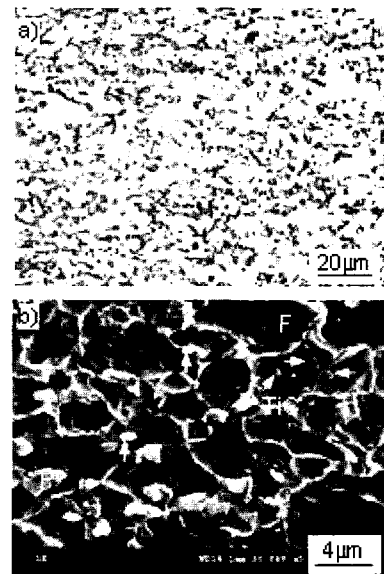


Fig. 4 Optical microstructure(a) and SEM structure(b) of raw material

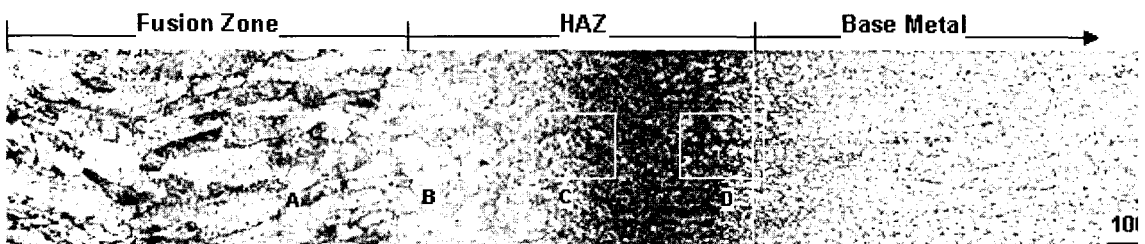


Fig. 5 Optical microstructures near the weld with a welding speed of 6.0m/min

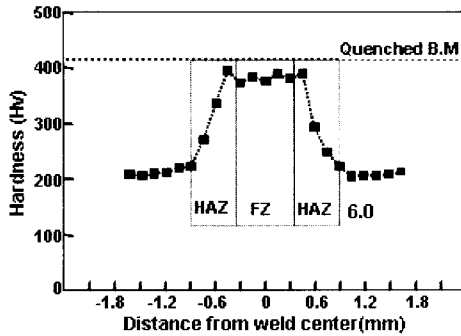


Fig. 6 Hardness distribution near weld (6.0m/min)

비커스경도기를 사용하여 용융부 중심으로 부터 150 $\mu$ m간격으로 측정하였고, 그림에 표시한 점선은 1223K까지 고주파로 급속가열 후, 수냉한 시편의 경도값을 나타낸다. 용접부의 경도분포는 모재보다 높고, 용융부와 인접한 열영향부(HAZ)에서 최대경도를 나타내며, 모재 쪽으로 갈수록 경도가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 Fig. 5에 표시된 용융부(A), 본드라인 근처 HAZ(B), HAZ 중심(C), 모재 근방 HAZ(D)에 대한 광학현미경 조직과 이에 대응하는 SEM조직을 나타낸 것이다. 용융부 광학현미경조직(a)

및 SEM조직(e)의 특징과 용융부의 경도가 380HV인 것을 고려하면, 용융부의 조직은 입계 페라이트(화살표)와 마르텐사이트, 상부 베이나이트(UB)와 입내 페라이트로 구성되어 있는 것으로 추측된다. 한편 용융부 근처 HAZ의 미세조직은 용융부와 달리 입계 페라이트가 없고, 상부 베이나이트보다 하부 베이나이트 및 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있고, 상의 크기도 더욱 미세한 것을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 용융부 근처 HAZ의 경도가 가장 높은 것으로 생각된다. HAZ부의 경도가 용융부에서 모재 쪽으로 갈수록 경도가 감소하는 것은 페라이트 양이 증가하기 때문이다.

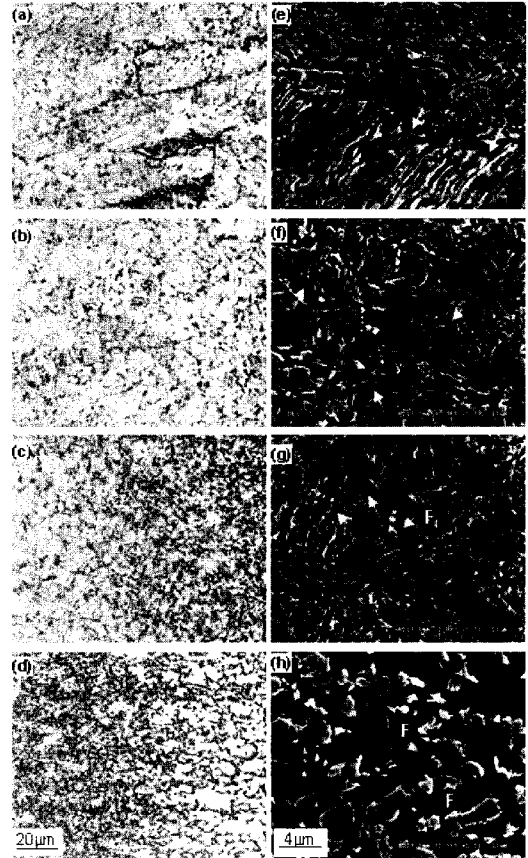


Fig. 7 Optical microstructures and SEM structures of each region in the weld with a welding speed of 6.0m/min. (a), (e) fusion zone, (b), (f) HAZ near fusion zone, (c), (g) center of HAZ, (d), (h) HAZ near base metal

Fig. 8은 용접속도 2.1m/min의 조건으로 레이저 용접한 시편의 용융부 근처의 경도 분포를 나타낸 것이고, 각 영역의 대표적인 광학현미경 조직과 이에 대응하는 SEM조직을 Fig. 9에 나타낸다. 2.1m/min의 용접부의 경도분포의 경향은 6.0m/min의 것과 유사하지만, 경도값 전체가 낮다. 용융부의 미세조직은 광학현미경에서도 판별할 수 있는 조대한 입계 페라이트(GBF)와 베이나이트 페라이트가 혼재하고 있으며, HAZ에서는 입계 페라이트와 아주 미세한 상부 베

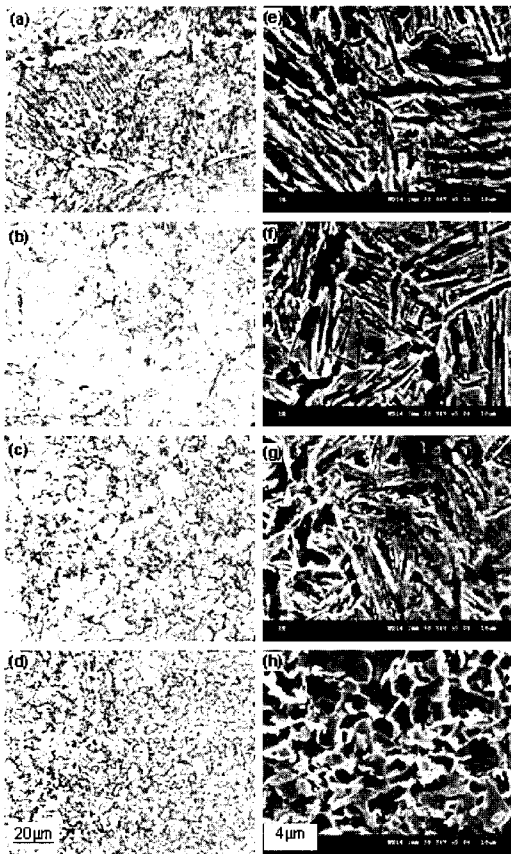


Fig. 8 Optical microstructures and SEM structures of each region in the weld with a welding speed of 2.1m/min. (a) and (e) fusion zone, (b) and (f) HAZ near fusion zone, (c) and (g) center of HAZ, (d) and (h) HAZ near base metal

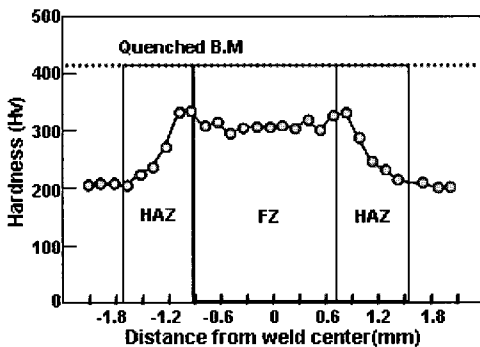


Fig. 9 Hardness distribution near weld (2.1m/min)

이나이트 조직이 관찰된다. 전반적으로 6.0m/min 용접부의 조직보다 경도가 낮은 상들로 구성되어 있으므로 6.0m/min의 것보다 경도가 낮다.

Fig. 10은 용접속도에 따른 용융부와 HAZ에서 최고 경도값의 변화를 비교한 것이고, 그림에 표시된 점선은 원소재를 수냉한 시편의 경도값을 나타낸 것이다. 모든 용접조건에서 HAZ(용융부에 인접한 HAZ)의 경도가 용융부보다 높으며, 용접속도가 증가함에 따라 각 영역에서 최고 경도값이 증가하지만, 수냉한 것보다 낮으며, 용융부와 HAZ의 최고 경도값 차이도 감소하고 있다.

용접속도가 빠를수록, 즉 입열량이 적을수록 냉각속도가 빠르게 되어, 펄라이트 변태보다도 베이나이트 혹은 마르텐사이트 변태가 진행되므로 경도가 상승하는 것으로 생각된다.

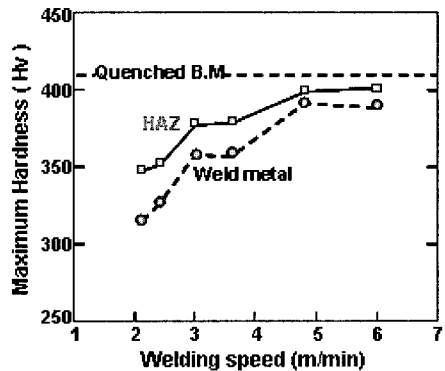


Fig. 10 Change of maximum hardness with the welding speed

### 3.3 용접부의 인장성질

Fig. 11은 용접선에 수직하게 인장시험한 경우, 용접속도에 따른 인장성질을 나타낸 것이고, 그림에 나타낸 점선은 모재의 각 값들을 나타낸 것이다. Fig. 12는 전형적인 파단된 시험편 양상을 나타낸 것이다. 모든 용접조건인 인장시험편은 Fig. 12와

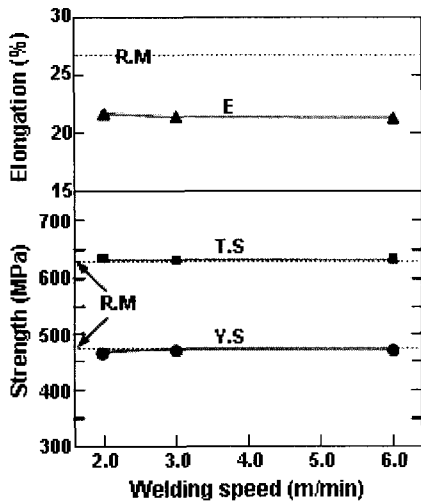


Fig. 11 Change of tensile properties with welding speed



Fig. 12 Specimen fractured under perpendicular tensile load to weld line

같이 모재에서 파단되었다. Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 시험편의 항복강도, 인장강도는 모재의 것과 거의 동일하지만, 연신율은 모재의 것보다 낮게 나타난다. 그러나 모재에서 파단되었음에도 불구하고, 모재의 연신율보다 낮은 것이 특징이다. 이것은 Fig. 12의 파단된 시험편 모양에서 알 수 있는 것처럼, 강도(경도)가 높은 용접부로 인한 소성구속이 발생하여 모재의 연신율이 다소 감소한 것으로 생각된다. 이러한 경우 평행부의 길이에 따라서 연신율이 달라질 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

차체경량화 소재인 600MPa급 석출경화형 강을 Nd:YAG 레이저출력 3.5kW에서 용접속도를 변화시켜 용접한 경우, 용입현상, 용

접부의 미세조직 및 경도, 인장성질에 미치는 용접속도의 영향을 검토하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 저속에서는 기공, 고속에서는 스패터 결합이 발생하였으나, 용접속도 2.1m/min~6.0m/min 범위에서는 결합이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

2. 저속도의 비드들은 상부의 폭이 하부의 폭보다 좁은 사다리꼴 형상을 하지만, 용접속도가 증가함에 따라 비드 폭이 감소하면서 상하 폭이 비슷한 X자 혹은 I자 형상 형상으로 변화하는 경향을 보였다.

3. 용접조건과 관계없이 경도분포는 용융부보다 본드라인 근처 HAZ에서 최고경도를 나타내었다. HAZ의 경도는 모재 쪽으로 갈수록, 페라이트의 증가로 인해 감소하였다. 용접속도의 증가에 따라 용융부와 HAZ의 최고 경도 값은 증가하였다.

4. 용융부의 조직은 용접속도가 느릴수록 입계페라이트가 조대해지고, 상부 베이나이트가 증가하였고, 이로 인해 경도가 감소하였다. 용융부와 가까운 HAZ의 조직은 용융부와 유사하였으나, 입계 페라이트가 미세하고 불연속적이었고, 모재 쪽의 HAZ는 페라이트양이 많았다.

5. 용접선에 수직으로 인장한 경우, 모든 용접조건에서 항복강도 및 인장강도는 모재와 동일하였지만, 연신율은 용접부의 소성구속으로 인해 모재보다 낮았다.

#### 참 고 문 헌

1. K. I. Sugimoto, N. Ushi, M. Kobayashi and S. I. Hashimoto : ISIJ Int TR1000, **32** (1992), 1311.
2. H. C. Chen, H. Era and M. Shimizu : Metall. Mater. Trans. A, **20A**(1989), 437.
3. Y. Sakuma, O. Matsumura and H. Takechi :

- Metall. Mater. Trans. A, **22A** (1991), 489.
4. L. Quintino, P. Vilaca, R. Rodrigues and L. Bordalo : *Welding Journal*, (2001), 261
  5. J. K. Kristensen : *Potential and challengers in laser welding structural steels* (The industrial laser hand book, 1993).
  6. C. M. Banas : *The industrial Laser Annual Handbook* (Tulsa, Pennwell Publications, 1986).
  7. J. Suh and Y. H. Han : *J. KWS Vol. 12* (1994), p. 49.
  8. M.Y. Kransnoperov, R.R.G.M. Pieters : *LMP* p. 285.