

## 자동차용 1.5GPa급 핫스탬핑 강판의 레이저 용접성

김 용·박 기 영·이 경 돈

### Laser Welding Characteristics of 1.5GPa Grade Hot Stamping Steel for Automobiles

Yong Kim, Ki-Young Park and Kyoung-Don Lee

#### 1. 서 론

최근 세계 자동차 산업의 동향은 공급과잉이 심화되어 자동차 업계 간의 출혈경쟁이 진행되고 있으며, 신기술의 적용을 통하여 품질의 향상과 원가절감을 동시에 이루어야만 살아남을 수 있는 극도의 경쟁체제에 놓여있다. 더욱이 자동차 산업은 대표적인 국제화 사업으로서 기술, 자본, 판매, 생산 등의 모든 분야에서 국경이 무너지고 있으며 '세계'라는 하나의 시장에서 누가 살아남느냐 하는 경쟁이 더욱 심화되고 있다. 이러한 생존경쟁에서 살아남기 위해서는 세계적으로 인정받을 수 있는 부품과 금형 및 조립 등의 우수한 생산기술을 갖추어 경쟁전략의 핵심인 국제경쟁력 확보가 필요하다.

특히, 자동차 산업 가운데 차체 부품업체는 기술력 확보를 통한 가격 경쟁력 강화가 필수적으로 무엇보다도 부품조립의 Cycle Time 감소와 Panel의 무게감소를 통한 원재료비 절감 등을 추구하고 있다. 현재의 자동차 차체부품의 조립방법은 대부분 다관절 로봇을 이용한 점용접(spot welding)으로 각 단품을 조립하고 있다. 하지만 점용접은 형상이 복잡한 조립품에 대해서는 로봇의 이동경로 및 제품과 건(gun)의 간섭 정도에 따라 Cycle Time이 증대되거나 조립이 불가능한 경우도 자주 발생할 뿐만 아니라 용접 건에 의한 접촉식 용접으로 불필요한 플랜지 폭이 일정 이상 확보되어야 한다. 강도 측면에서도 직접적인 응력을 받는 부위에는 강도 보강용 브라켓이 추가적으로 장착되어 차체 경량화에 걸림돌이 된다. 따라서 이러한 문제점들을 극복하며 차체의 고안전, 고강도 부품을 개발하기 위한 많은 방법들이 연구되어 왔는데, 근래에는 고강도강에서부터 핫 스탬핑(Hot stamping)공법으로 제작된 초고강도강(UHSS, Ultra High Strength Steel)의 적용을 위한 기술까지도 개발 중에 있다<sup>1-3)</sup>. 핫 스탬핑이란 경화능이 우수한 보론(Boron)강판을 900℃ 이상의 고온으

로 가열하여 한 번에 열간성형과 급속냉각을 병행하여 초경량 초고강도의 부품을 제조하는 신 가공기술로서 스페인 차체부품업체인 "GESTAMP"에서 공법이 개발된 뒤 독일의 "Thyssen Krupp"와 설비 협력을 통해 전 세계에 점차 기술보급이 되고 있는 추세이다.

이러한 고강도강 부품은 1,500MPa 이상의 강도를 나타내면서도 우수한 가공성과 연신율로 인해 미래 친환경 자동차의 연비와 안전성 향상을 위한 차세대 자동차용 강재로 부각되고 있다. 뿐만 아니라 우수한 성형성으로 인한 치수정밀도가 기존강판 대비 90% 이상 향상되어 우수한 성형품질을 확보할 수 있는 장점도 있다<sup>3)</sup>.

Fig. 1은 고강도강 적용에 적합한 주요부품을 나타낸 것으로 이들 부품은 충돌 대응 핵심요소로 고강도의 물리적 성질이 요구된다. 이에 따라 기존에는 강판 두께와 보강용 브라켓을 통해 충돌시험 기준을 만족하였으나 고강도강으로 대체됨에 따라 Fig. 2와 같이 보강재 부품을 최소화하여 Cycle time 감소 및 원가절감 효과도 기대할 수 있다. 이에 따라 2000년대 초반부터 국내에도 몇몇 철강 회사 및 차체업체를 중심으로 기술검토 및 설비도입을 통해 2009년을 기점으로 신규차체에 일부 적용되고 있으며 지속적으로 확대되어 나가고 있

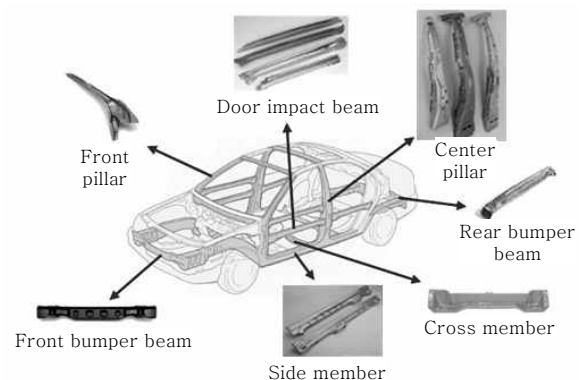


Fig. 1 Applications of hot stamped components

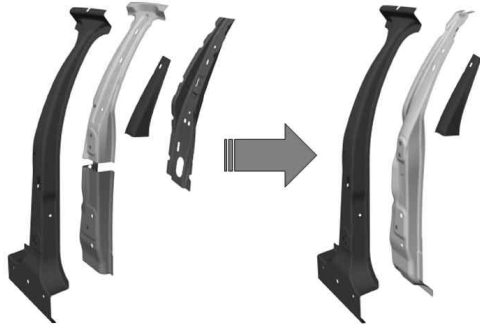


Fig. 2 Sub-assembly price and tooling investment reduction in comparison to the equivalent cold forming solution.

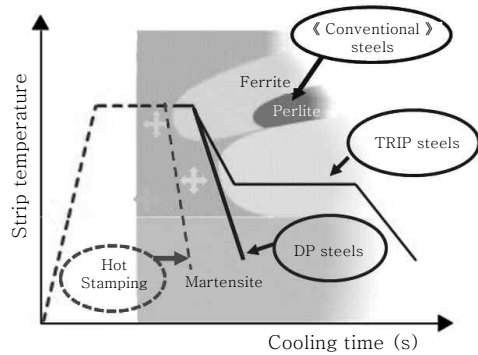


Fig. 3 Continuous cooling transformation (CCT) diagram for hot stamping process

는 추세에 있다.

한편 레이저 용접은 타 용접법에 비해 용접속도가 빠르고 입열량이 작아 열변형이 작은 이점이 있고, 비드 외관이 미려할 뿐만 아니라 정밀성, 안정성이 높다. 이런 특성으로 인해 일본, 독일, 미국 등 자동차 생산기술의 선진국들은 이미 많은 부분에 레이저용접기술을 도입, 응용하고 있으며 국내에서도 기존 저항 점용접을 대체하기 위한 차세대 생산기술로서 각광받고 있다<sup>4-8)</sup>. 용접기술은 차량의 안전성과 직결되는 기술로서 다양한 강재의 개발 발맞추어 적합한 용접기술이 요구되며 국내에서는 레이저용접기술이 본격적으로 소개된 1990년대 초반부터 산·학·연 전반에 걸쳐 아연코팅강판의 레이저용접 및 테일러드 블랭크 용접을 시작으로 인장강도 400~800MPa급 DP강을 비롯하여 TRIP, TWIP, 석출경화형강과 같은 고장력강판의 CO<sub>2</sub>, Diode 및 Nd:YAG 레이저 용접 등에 관한 많은 연구가 진행되었다<sup>9-13)</sup>. 반면 핫스탬핑강의 도입은 최근에야 이뤄짐에 따라 관련 레이저 용접기술은 아직까지는 국내에 관련 연구결과를 거의 찾아볼 수 없다.

이에 본 기고에서는 최근 차체에 적용되고 있는 핫스탬핑 강판의 레이저용접성에 대해 지금까지 국내외에 보고된 연구결과들을 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

## 2. 핫스탬핑 강판의 특성

핫스탬핑 기술의 핵심은 Fig. 3과 같이 고온 성형과 급랭에 의한 변태강화이므로 이에 사용되는 강재는 고온의 오스테나이트상에서 적절한 냉각속도에 의해 마르텐사이트상으로 변태될 수 있는 경화능이 향상된 화학 조성을 가져야 한다. 일반적으로 소입성(hardenability)을 향상시키기 위해서 B, Mn, Cr, Mo 등을 첨가하며 이들 원소의 조성은 경제성과 함께 열처리 후 얻어지는

기계적인 성질을 고려하여 적절히 결정된다. 특히 보론(B)이 미량(0.001~0.003wt%)으로 첨가되는 경우 강의 소입성이 현저히 향상되는 특징이 알려지면서 소입성 향상 원소로서 광범위하게 이용되며 이에 Table 1과 같은 화학조성을 갖는 22MnB5 형태의 보론강이 핫스탬핑 강 제조에 가장 많이 이용되고 있다<sup>14)</sup>. Table 2는 보론강의 핫스탬핑 공정 전후의 기계적 물성치를 나타내고 있으며 공정 후 신율이 약간 저하되지만 인장강도 측면에서 매우 우수한 기계적 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 급속학적

Table 1 Chemical compositions of material(wt%)

Materials	Al	B	C	Cr	Mn	Si	Ni	Ti
22MnB5	0.03	0.002	0.23	0.16	1.18	0.22	0.12	0.040

Table 2 Mechanical properties of boron steels

Properties	As delivered	Hot stamped
Yield strength (MPa)	457	1,010
Tensile strength (MPa)	608	1,478
Elongation (%)	10	6
Vickers hardness (Hv)	220	480

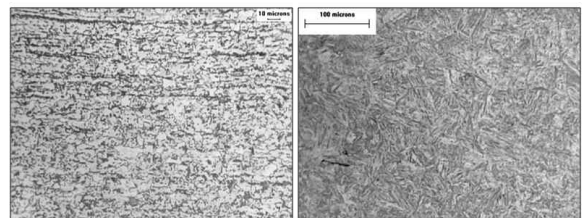


Fig. 4 Hot stamping steels microstructure before and after the treatment, respectively

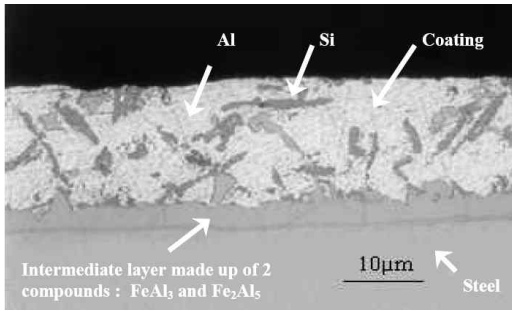


Fig. 5 Details of Al-Si coating layer before hot stamping

측면에서도 페라이트와 펄라이트로 구성된 보론강 기지 조직이 다이 쿼칭을 통해 100% 침상 마르텐사이트로 변태한 것을 볼 수 있으며 이러한 조직은 이후 용접열 영향부 부근에서 템퍼링 효과로 인해 용접 후 문제를 야기시킨다.

한편 핫스탬핑 기술에 의한 성형 공정은 900°C 이상의 가열공정을 수반하기 때문에 분위기 가스 등에 의한 산화 방지를 하지 않을 경우 강제 표면에 산화에 의한 스케일(scale) 생성 및 표면 탈탄 현상이 발생하게 된다. 그러므로 가열 전 강제 표면에 산화를 방지하기 위해 Al-Si 코팅을 하게 된다<sup>1-2,14</sup>. Fig. 5는 보론강의 핫스탬핑 전 코팅층을 OM관찰한 결과로서 보론강 코팅층의 두께는 일반적으로 약 25~30µm 정도로 형성된다.

### 3. 레이저 용접성 고찰

핫스탬핑 강 조직은 앞서 설명한 바와 같이 급속 쿼칭을 통한 마르텐사이트 조직으로서 이는 일반 저탄소강의 고속 저입열 레이저용접에 의한 급격한 용융/냉각 열 사이클을 받아 형성되는 레이저 용접부의 마르텐사이트 조직과 유사하게 나타난다. Fig. 6은 핫스탬핑 강 Nd:YAG 레이저 맞대기용접 후 측정된 경도 및 미세조직 결과를 나타낸다. “A” 영역에 해당하는 용접 금속의 경우 급속한 용융 및 냉각으로 인해 전형적인 마르텐사이트 조직으로 재형성되며 경도는 약 Hv444 정도로 측정되었다. 용접금속과 인접한 조대열영향부인 “C” 영역에서는 마찬가지로 마르텐사이트 조직을 나타내며 용접금속보다 조직의 크기가 조대화된 것을 볼 수 있다. 이후 1,100~900°C 영역의 영향을 받은 세립역인 “D” 영역에서는 경도값이 Hv472를 나타내며 최고 경도를 나타내었다. 한편 점차 모재 쪽으로 가게 되면 “E”영역과 같이 마르텐사이트 조직에서 템퍼링이 일어나 경도가 급격히 저하되는 영역을 발견할 수 있는데 이는 핫스탬핑 강판의 레이저 용접부에서 가장 취약한 위치로 확인된다.

한편 Fig. 6의 용융금속 조직(“A”영역)을 주의 깊게 살펴보면 Al-Si 코팅층이 유입된 것을 확인할 수 있으며, 이는 이미 여러 연구자들에 의해 Al-Si 화합물임이

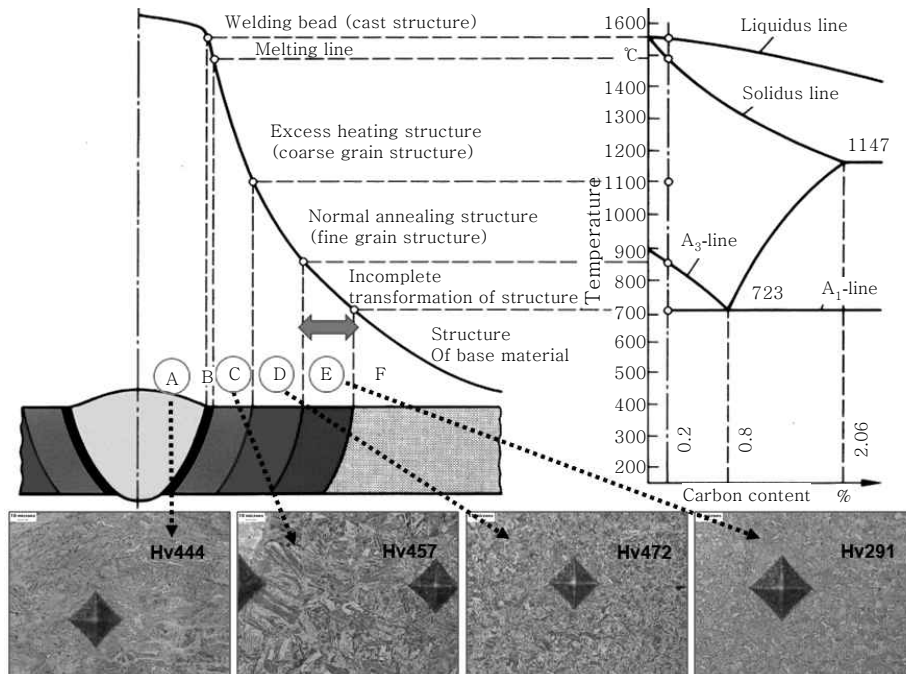


Fig. 6 Microstructure and hardness value of weld metal and heat affected zone on hot stamping steel welded by Nd:YAG laser

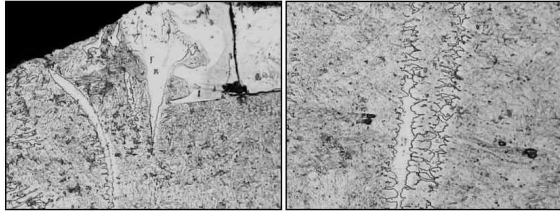


Fig. 7 Laser weld bead with coating inclusion

판명되었다. Fig. 7은 코팅층이 유입된 형상을 OM 확대 관찰한 것으로 용접부 강도 저하의 최대 요인으로 지목된다. 최근 발표된 J. Choi<sup>15)</sup>의 연구결과에 따르면 레이저 빔 직경이 작아 저입열 고속 용접을 적용할 경우 상대적으로 연화되는 열영향부의 폭이 작아 이에 따른 강도 저하보다 좁은 용접 금속부에 유입된 Al-Si 코팅층에 의한 용접부 취성에 대한 영향이 더욱 커 인장시험 시 용접부 파단이 발생한다고 발표하였다. R. Arias<sup>16)</sup>와 W. Ehling<sup>6)</sup>의 경우 또한 강도저하의 원인을 Fig. 8과 같이 Al-Si 코팅층으로 판단하여 이를 보완하기 위해 펄레이저를 이용하여 코팅 층을 어블레이션(ablation) 후 용접하게 되면 Fig. 9와 같이 성형성이 10~15% 정도 증가한다는 보고를 하였다.

코팅층을 제거하지 않고 Nd:YAG 레이저를 이용하여 출력은 3kW로 고정하고 용접속도만 변화시켜 가며

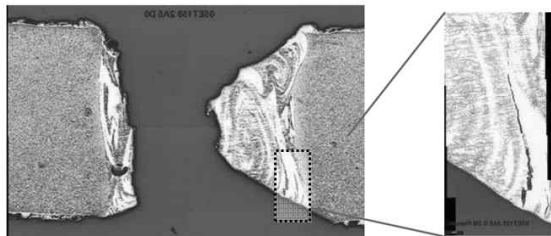


Fig. 8 Failure of a polluted weld in a dynamic tensile test

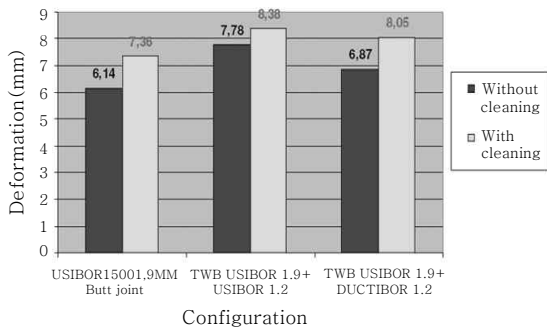


Fig. 9 Formability with/without edge cleaning comparison

맞대기 용접 후 인장시험을 실시한 결과는 Fig. 10에 제시하였다. 실험결과 Fig. 9와 같이 모든 용접부의 맞대기 인장강도는 원소재보다 작은 값을 나타내었다. 여기서 완전 용입 조건인 용접속도 5m/min 이하의 입열량 조건에서는 용접속도가 증가할수록 인장강도가 상승하는 결과를 나타내었으며, 그 상승폭이 갈수록 줄어들어 4m/min과 5m/min의 용접속도에서는 거의 유사한 값을 나타내었다. 이와 같이 용접속도의 증가(입열량의 감소)에 따라 인장강도가 증가하는 이유는 열영향부 폭의 감소에 따른 마르텐사이트 템퍼링 영역이 감소되었기 때문이다. 파단 위치 또한 예상과 같이 Fig. 11과 같이 모재와 인접한 최저 경도를 갖는 지역에서 모두 파단이 발생하였다. 즉, 최저 경도를 갖는 템퍼링 된 마르텐사이트 지역은 4m/min 이상의 용접속도에서는 감소하기 때문에 인장강도의 더 이상의 상승 없이 유사한 값을 나타낸다고 판단된다. 또한 일부 완전 용입 조건을 보이는 6m/min의 용접속도일 때와 부분 용입 조건인 7m/min에서는 각 종류별 시험편의 강도 측정치 분포 차이가 나타났으며, 일부 시험편에서는 완전 용입 조건보다 더 큰 강도 값을 나타내었다.

한편 겹치기 용접 특성 또한 맞대기용접과 마찬가지로 열영향부의 연화가 가장 큰 문제로 나타난다. Fig. 12는 1.2t 두께를 갖는 핫스탬핑 강판을 3kW Nd:YAG

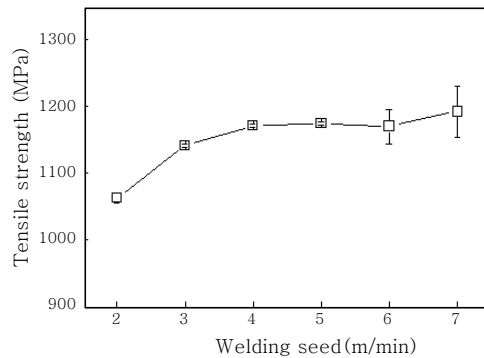
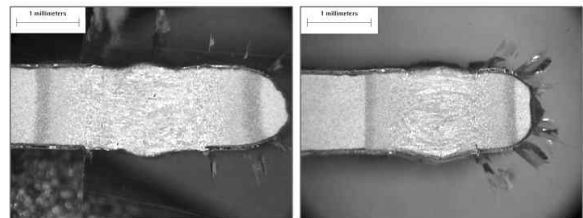


Fig. 10 Tensile strength value for various welding speed (Heat input condition)



(a) V=2m/min (b) V=5m/min

Fig. 11 Fracture location of tensile test according to heat input conditions on butt joint

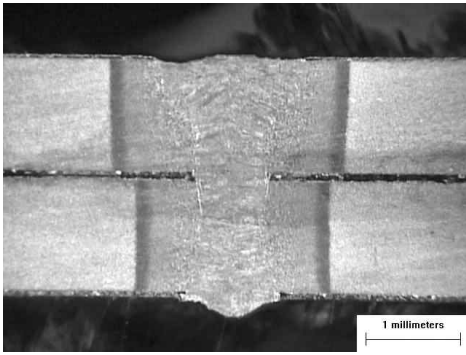


Fig. 12 Cross section of lap joint welding of hot stamping steel by means of Nd:YAG laser

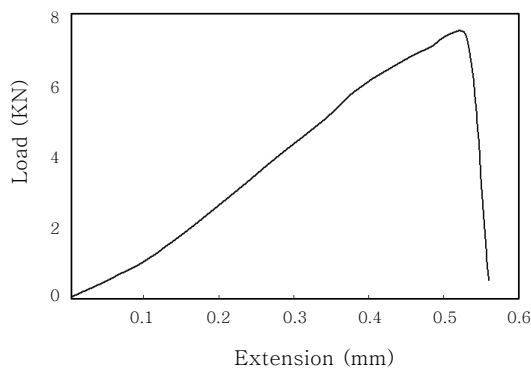


Fig. 13 Load-displacement diagram of the lap joint welding on hot stamping steel

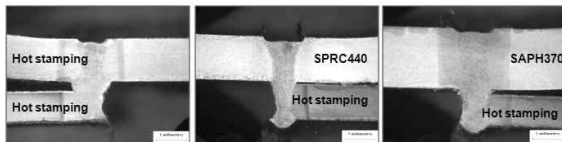


Fig. 14 Fracture location of various material combination with hot stamping steels

레이저를 이용하여 겹치기 용접한 결과로 2m/min의 속도에서 완전 용입을 달성하였다. 이를 KS B 0851에 의거하여 시험편 폭 12.5mm로 제작 후 인장 시험을 실시하였으며, 이에 따른 하중-변위 선도는 Fig. 13에 제시하였다. 용접부는 핫스탬핑 강판끼리 겹치기 용접한 경우 뿐 아니라 일반 강판과의 조합에서도 모두 소성변형을 거의 일으키지 않은 취성파단 경향을 나타냈으며, 이때 파단 위치는 맞대기 용접 인장시험결과와 마찬가지로 모재와 인접한 최저 경도를 갖는 지역에서 파단이 발생하였다. 파단 시 나타난 최대 하중은 7,283N으로 단위길이 당 582.6N/mm의 값으로 표현된다.

#### 4. 맺 음 말

핫스탬핑 강판은 차체 경량화 및 고안전화를 달성하기 위한 차세대 소재임에도 불구하고 본 기고에서 언급된 열영향부의 연화 및 코팅층의 용융금속 유입에 따른 강도 저하의 우려로 인해 레이저 용접의 활발한 적용은 아직까지 현실적으로 어려운 실정이다. 이에 많은 연구자들이 문제점을 인지하여 이를 해결하기 위한 갖가지 시도를 하고 있으며 국내에서도 자동차산업의 비중이 차지하는 위상과 레이저 용접 공정의 이점을 감안하여 시급한 해결방안을 모색하여야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. Taylan Altan., "Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, Part 1 : Process method and uses", Stamping Journal, December 2006
2. Advanced High Strength Steel(AHSS) Application Guidelines, Int. Iron & Steel Institute, 2006. 9
3. J. Choi, M. Kang, J. Cho and C. Kim, "Laser welding characteristic of ultra high strength steel for automotive application". Journal of KWS, 27-5 (2009), 471-474 (in Korean)
4. M. Y. Kransnoperov, R.R.G.M. Pieters, LMP p.285
5. T.K. Han, B.H. Jung and C. Y. Kang, "Effect of the welding speed on the characteristics of Nd:YAG laser welds for automotive application : 600MPa PH high strength steel", Journal of KSLP, 10-3, 2007
6. W. Ehling, L. Cretteur, A. Pic, R. Vierstraete, Q. Yin, "Development of a laser decoating process for fully functional Al-Si coated press hardened steel laser welded blank solutions", Proceeding of the 5th Int. WLT-Conf. on LIM, 2009. 6
7. J. Suh, Y.H.Han. "Laser welding in automotive industry", Journal of KWS, 12 (1994), 49-63(in Korean)
8. A. Ribolla, G. L. Damoullis and G. F. Batalha. "The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white", Journal of Mater. process. Technology, 164-165 (2005), 1120-1127
9. Jin-Young Jang. etc on., "Effect of welding speed on mechanical properties and formability in Nd:YAG laser welds of 1,000MPa Grade DP steel", Journal of KWJS. 27-2, (2009), 187-193 (in Korean)
10. Tae-kyo Han. etc on., "Characteristics of CO<sub>2</sub> or Nd:YAG laser welded 600MPa grade TRIP steel", Journal of KWS, 24-1 (2006), 56-63 (in Korean)
11. In-sung Jang. "Nd:YAG laser welding for side panel", Journal of KWS. 19-4, (2001), 371-374 (in Korean)
12. K. C. Kim, etc on., "Laser weldability of sheet steels for Tailored Blank Manufacturing", Journal of KWS, 16-1 (1998), 26-36 (in Korean)

13. J. Suh. etc. on., "CW CO<sub>2</sub> laser beam welding and formability of Zn-coated steel plates", Journal of KWS, 13-1 (1995), 577-587 (in Korean)

14. H. Karbasian and A. E. Tekkaya, "A review on hot stamping", Journal of Mater. Proc. Technology, 210 (2010), 2103-2118

15. J. Choi. etc on., "A study on laser welding characteristics of 1,500MPa grade ultra high strength steel for automotive application", Journal of KSLP, 13-3, (2010), 19-26 (in Korean)

16. Rosa Arias etc on., "Laser welding applied to advanced high strength steels for automotive application", ICALEO, 1002 (2010), 371-379



- 김 용
- 1979년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 용접가공
- e-mail : welding@iae.re.kr



- 박기영
- 1962년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 레이저 용접 및 자동화
- e-mail : young@iae.re.kr



- 이경돈
- 1957년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 레이저 용접 및 자동화
- e-mail : kdlee@iae.re.kr