

1.5GPa급 자동차용 고강도강의 레이저 용접부 특성평가

김용*, 박기영*, 이경돈*, 정준교**, 김동화**

*고등기술연구원, ** (주)새한산업

Evaluation of Laser Welding Characteristics of 1.5GPa Grade Ultra High Strength Steel for Automotive Application

Yong Kim*, Ki-young Park*, Kyoung-don Lee*, Jun-kou Jeong**, Dong-wha Kim**

*Institute for Advanced Engineering, ** SAEHAN Industrial Co., LTD.

Abstract

Recently the use of ultra high strength steels (UHSS) in structural and safety component is rapidly increasing in the automotive industry. For example, 1.5GPa grade hot stamping with die-quenching of boron steel 22MnB5 could apply crash-resistant parts such as bumpers and pillars. The development of laser welding process of hot stamping steels, fundamental bead-on-plate welding and lap joint welding test were carried out using 3kW Nd:YAG laser. Local hardening & HAZ softening occurred in hot stamping steel as a result of metallurgical change caused by the welding heat input in the Nd:YAG laser welding process. The size of soft zones in the hot stamping steel was related to the welding heat input, being smaller at high speeds which generated a smaller heat input. Also in the case of lap joint design structure, same welded characteristics were shown. The HAZ softening degree was controlled to ensure the joint strength.

Keywords: Nd:YAG, UHSS, hot stamping, automotive body, weldability, bead-on-plate

1. 서론

최근 유가상승에 따른 연비절감 및 CO₂ 환경규제 강화 등의 요구로 인해 세계 자동차 선진 각국에서는 고연비화를 통한 친환경성 자동차 개발 및 고안전화, 고성능화 및 차체 경량화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 차체 경량화는 자동차의 중량을 줄여 배출가스를 감소시킴과 동시에 차체 경량화에 기인한 환경오염 개선뿐만 아니라, 앞으로 5년 이내에 개발 완료될 연료전지 자동차와 같은 미래형 자동차의 효율 향상을 위해서도 경량화 기술개발은 더욱 절실히 요구된다.

한편 차량의 안전성 확보 측면 또한 중요한 이슈로 대두되고 있다. 차량의 안전성은 교통사고 시 운전자 및 승객, 더 나아가 보행자의 생명과 직결되는 사안이며, 점차적으로 이에 대한 소비자의 요구가 증가되어지고 있어 이를 무시할 수 없는 상황에 직면하게 되었다. 경량 비철재료의 적용 증가

에 따른 대응과 안전성 확보를 위해 최근 자동차 부품업체는 기존 적용되는 고강도강(HSS; high strength steel)에 비해 동일 두께에서 강도 및 성형성이 우수한 새로운 고강도강(AHSS; advanced high strength steel)을 개발하였으며 차체부품 적용을 위한 기술개발을 진행 중이다. 자동차용 강재를 인장강도별로 분류를 하면 270MPa 미만을 저강도강판, 270-700MPa급을 고강도강판(HSS), 그리고 700MPa 이상을 초 고강도강판(UHSS)으로 분류하는데,^{1,2} 국내 철강업체의 경우 인장강도 590-980MPa급의 고강도강을 개발하여 차체 경량화에 대응하고 있으며, 샤시분야의 경우 540-780MPa급의 고강도강이 적용되기 시작하고 있다. 그런데 이렇게 개발된 고강도강의 경우 그 특성으로 인하여 복잡한 형상이나 스프링백 등의 성형성 문제로 인해 차체 부품 적용에 문제가 나타나게 되었고, 최근에는 이들 소재의 강도와 연신율을 확보한 TRIP(transformation induced plasticity), TWIP(twinning-induced plasticity

steel) 및 hot stamping 강 등이 개발되었다.³

그 중 hot stamping 강은 경화능이 우수한 보론(boron)강판을 900℃ 이상의 고온에서 열간성형을 실시하기 때문에 성형할 때 강도는 400-700MPa 정도로서 낮고, 급속냉각을 병행하여 강도는 1,500MPa 급의 초경량 초고강도의 부품을 제조하는 신 가공 기술로서 차체 부품업체인 “Arcelor”에서 공법이 개발된 뒤 독일의 “ThyssenKrupp”와 설비 협력을 통해 전 세계에 점차 기술보급이 되고 있는 추세이다.

이에 따라 본 연구에서는 최근 차체에 적용되고 있는 hot stamping 강에 대한 레이저용접특성을 알아보고자 Nd:YAG 레이저 용접을 실시하고 용접성, 용입 현상, 미세조직 및 경도 그리고 인장특성 및 강도에 미치는 공정변수에 대한 영향 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 레이저는 빔 직경이 600μm, 초점거리 200mm인 최대 3kW의 CW Nd:YAG로 레이저 헤드는 6축 로봇에 장착하였으며, 모든 용접 조건에서 초점위치는 재료 상부표면을 기준으로 하였다. 실험에 사용한 소재는 1.2mm의 두께로 1,470MPa의 인장강도를 갖는 hot stamping 판재이며 소재 조성은 Table 1과 같다. 실험에서는 용접속도와 보호가스 유무 등의 공정변수에 따른 용접성을 평가하여 공정변수를 최적화 하고자 하였다. 이때 hot stamping 판재의 양면에 도금되어 있는 Al-Fe 도금층이 용접성에 영향을 미치는지 파악하기 위해 표면 연마를 실시한 조건도 포함되었다.

한편 겹치기 용접의 경우 충분한 예비실험을 통해서 적정 용접조건을 도출하였으며 spot 용접시편과 강도를 비교하고자 인장시험을 실시하였다. 인장시험의 경우 KS B 0851에 의거하여 실시하였으며 금속조직 평가를 위해서 2%-Nital 용액을 사용, 수초 간 부식 후 관찰하였다. 마지막으로 경도는 비커스 경도계를 사용하였으며, 압입하중 1kgf에 10초간 유지하였다.

Table 1 Chemical composition of material

Element	C	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
wt. %	0.21	0.30	1.27	-	0.017	0.004	Bal.

Table 2 Welding test parameters

	Power (kW)	Speed (m/min)	Shielding (l/min)	Other
1	3.0	2.0	No	
2		3.0		
3		4.0		
4		5.0		
5		6.0		
6		7.0		
7		5.0	Ar 16	
8		5.0	No	Surface polishing

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접부 단면

Fig. 1은 hot stamping 판재에 대한 BOP(bead-on-plate) 용접 후의 대표적인 단면 이미지를 나타내고 있으며, 이때의 용접속도는 5.0m/min이다. Hot stamping 판재는 양쪽 표면에 Al-Fe-Si 조성의 도금층이 형성되어 있는데, 이는 최초 22MnB5 보론강에 대해 hot stamping 공정 시 발생할 수 있는 산화, 탈탄방지 목적으로 Al-Si을 도금하게 된다. 이후 hot stamping 공정을 거치면서 스틸과 가까운 도금층은 Al-Fe 조성으로 변하게 되며 도금층의 표면은 Al-Si 형태로 존재한다. 비드 형상은 전형적으로 상하의 비드 폭이 비슷한 X자 형태의 비드가 형성되었으며 모재와 가까운 열영향부에는 하얀색 띠 지역을 관찰할 수 있는데 이는 모재의 마르텐사이트 템퍼링에 의해 나타나는 구간이다.

한편 모재의 최초 미세조직은 Fig. 2와 같이 전형적인 마르텐사이트 조직을 나타내고 있으며, 최초 22MnB5 보론강의 다이퀸칭을 통해 형성된 급속냉각

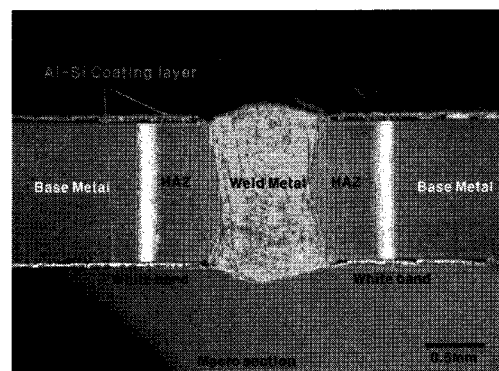


Fig. 1 Cross section of the laser weld bead.

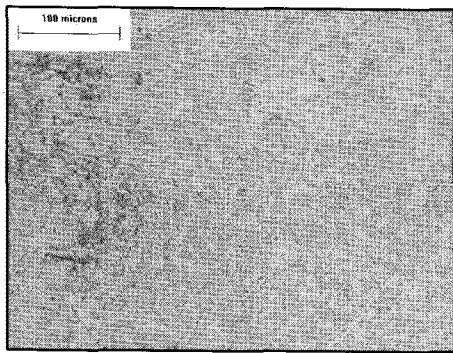


Fig. 2 Optical microstructure of the base metal (hot stamping).

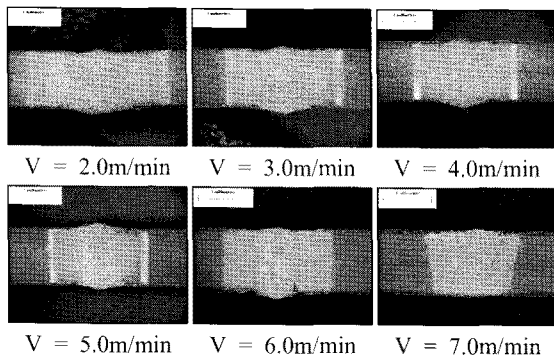


Fig. 3 Cross sections of the weld bead according to various welding speed.

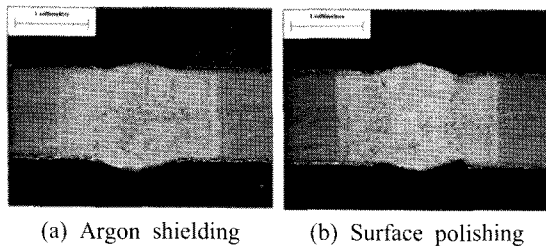


Fig. 4 Cross sections of applied argon shielding gas to 16l/min (a) and surface polishing to remove Al-Si coated layer (b).

조직이다. 이러한 기지조직을 갖는 hot stamping강의 레이저 용접 후 각 조직의 변화 및 경도는 3.2절에 언급하였다.

Fig 3에는 용접속도에 따른 용접부 매크로 단면 이미지를 나타내고 있다. 본 연구에서는 용접속도 5m/min 이하에서 완전용입이 발생하였으며, 용접속도가 가장 빠른 조건인 7m/min에서는 단면 비드 'V'자 형태인 부분용입이 발생하였음을 알 수 있다. 열영향부의 넓이 또한 용접속도에 의존한다. 용접속도가 느릴수록 열영향부 지역이 넓어지며 빠를수록 좁아진다. 또한 용입의 형태는 입열량 감소에 따라 'X'자 형태에서 'V'자 형태로 점점 변화되는데, 이는 레이저 입열량에 의한 것으로 용입

모드의 변화에 따라 나타나는 현상으로 알려져 있다. 즉 입열량 증가에 따라 나타나는 월 포커싱 효과(wall focussing effect)에 의해 기홀 아랫부분이 추가적으로 용융됨으로써 하부도 상부와 같이 용융이 활발해지게 되며,^{4,5} 이는 일반적인 스틸의 레이저 용접 시 나타나는 현상과 동일하다.

한편 보호가스 사용 유무에 따른 용접성을 검토한 결과는 Fig. 4(a)에 나타내었다. 실험결과 Ar을 보호가스를 사용하였을 때 레이저 용접 시 발생하는 플라즈마는 사용하지 않았을 때에 비해 육안상 스패터가 적고 매우 안정된 형태로 용접이 진행됨을 확인할 수 있었다. 하지만 용접부의 단면 형상은 사용하지 않은 단면 형상과 거의 유사하다. 즉, 동일한 입열 조건에서는 용접성 측면에서 보호가스의 영향은 미미함을 알 수 있다.

마지막으로 hot stamping 판재의 도금층이 용접성에 미치는 영향을 확인하기 위해 표면의 Al-Fe-Si 도금층을 제거하고 용접을 실시하였으며 이는 Fig. 4(b)에 나타내었다. W. Ehling⁶에 따르면, hot stamping강을 TWB(tailor welded blank) 용접 시 Al-Si 코팅층을 제거한 후 레이저용접을 하게 되면 강도 측면에서 보다 향상된 결과를 얻을 수 있다고 발표하였으나, 본 실험결과에서는 비드 외관, 매크로 단면 뿐 아니라 인장강도에서도 도금층을 제거하지 않은 시편과의 기계적 물성상 차이점은 거의 찾아볼 수 없었다.

3.2 미세조직 및 경도

비커스 마이크로 경도기를 이용하여 용접부 경도를 측정하였다. 측정은 용접부 중심에서 모재 방향으로 0.2mm의 간격으로 진행하였으며, 완전 용입 조건에서 가장 빠른 용접속도인 5.0m/min일 때와 가장 느린 용접속도인 2.0m/min의 용접 시편을 사용하였다(Table 2의 실험조건에서 No. 1 및 No. 5번 조건).

Fig. 5에서 보는 바와 같이 hot stamping 판재의 레이저 용접부와 가까운 열영향부에서 가장 큰 경도값을 나타낸다. 또한 용접속도가 빠를수록 전체적으로 경도가 상승함을 보여주고 있는데 이는 상대적으로 적은 입열, 빠른 냉각속도에 따른 마르텐사이트 분해량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 용접속도와 상관없이 열영향부 연화가 발생하며 느릴수록 연화지역이 더 넓어짐을 알 수 있다.

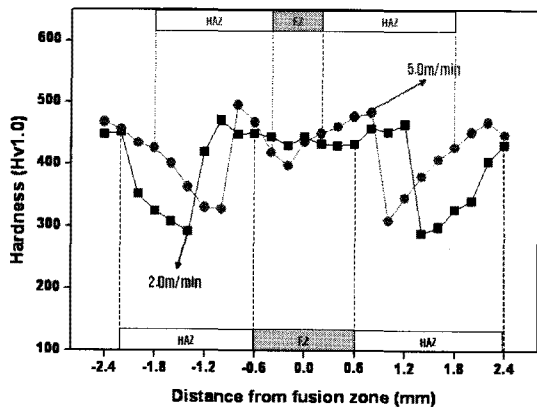


Fig. 5 Hardness distribution depending on heat input (welding speed 2 or 5m/min).

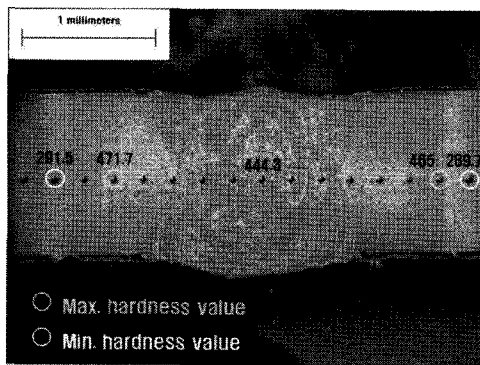


Fig. 6 Hardness distribution at 2m/min welding speed.

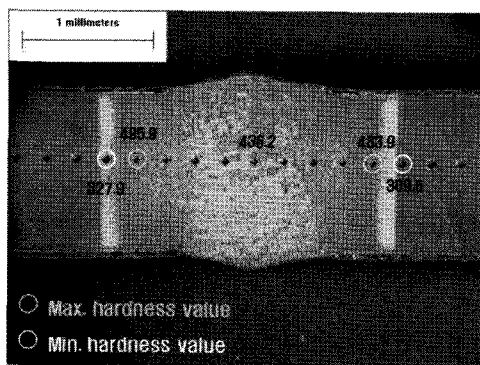


Fig. 7 Hardness distribution at 5m/min welding speed.

Fig. 6, 7에는 각각 고속, 저속 용접에서의 최고, 최저 경도값의 위치를 보여주고 있다. 단면의 흰색 띠를 전후하여 최고, 최저 경도값 지역이 존재하게 되며 이는 인장강도 테스트 시 최고 경도값과 최저 경도값 지역 사이에서 파단이 발생할 가능성이 높음을 예측가능하다.

미세조직의 경우도 경도분포결과와 맥락을 같이 하게 되며, 각 특정 위치에서의 미세조직은 Fig. 8에 나타내었다. 일단 전반적인 용접부 및 열영향부 조직은 기지조직인 마르텐사이트와 같은 형태를

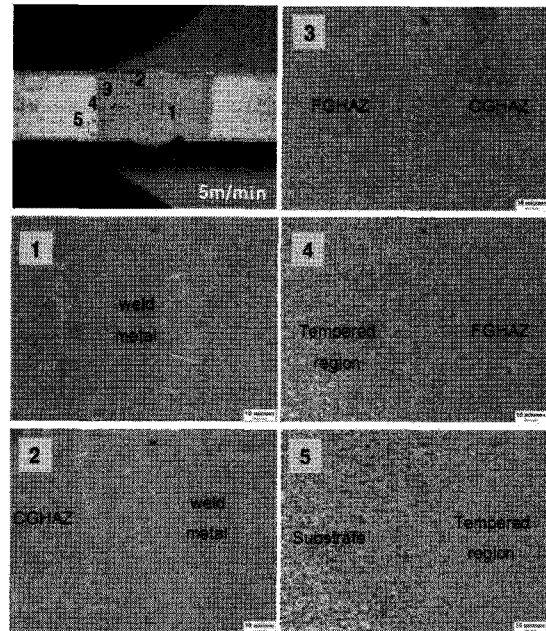


Fig. 8 Optical microstructure of each region in the weld.

나타내고 있으며, 각 위치별로 조직의 미세화 정도에 대한 차이만을 나타내었다. 일단 Fig. 8의 1번 조직은 용접부 센터라인을 관찰한 것으로 탄소강의 레이저용접 시 나타나는 전형적인 수지상정 조직을 보이고 있으며, 이 또한 전량 마르텐사이트 조직으로 관찰되었다. 이러한 형태는 용접부 뿐만 아니라 열영향부 전체 걸쳐 발견할 수 있다. 한편 점차 모재 쪽으로 가게 되면 4번 조직과 같이 마르텐사이트 조직에서 템퍼링이 일어난 영역(tempered region)을 발견할 수 있는데, 이는 경도 측정 시 최저 경도값을 나타내는 위치로서 인장시험 시 가장 취약한 위치로 나타남을 알 수 있다.

3.3 인장파단 특성

Hot stamping 강 of 레이저 용접부에 대한 인장 특성을 평가하고자 하였다. 즉 레이저 입열량에 따른 강도 변화를 확인하고자 하였으며, 강도 비교를 위해 hot stamping 모재에 대해서도 KS B 0851 규격에 기초하여 강도를 측정하였다.

실험결과 Fig. 9와 같이 모든 용접부의 맞대기 인장강도는 원소재보다 작은 값을 나타내었다. 완전 용입 조건인 용접속도 5m/min이하의 입열량 조건에서는 용접속도가 증가할수록 인장강도가 상승하는 결과를 나타내었으며, 그 상승폭이 갈수록 줄어들어 4m/min과 5m/min의 용접속도의 입열량 조건에서는 거의 유사한 값을 나타내었

다. 이때 파단 위치는 Fig. 11과 같이 모재와 인접한 최저 경도를 갖는 지역에서 모두 파단이 발생하였다. 즉, 최저 경도를 갖는 템퍼링 된 마르텐사이트 지역은 4m/min이상의 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 나타냈다.

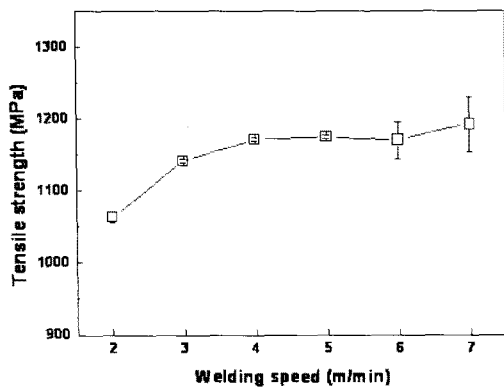


Fig. 9 Tensile strength value for various welding speed (heat input).

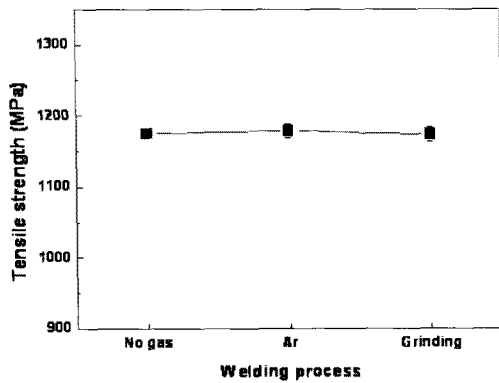


Fig. 10 Tensile strength value for shielding gas application or surface polishing treatment.

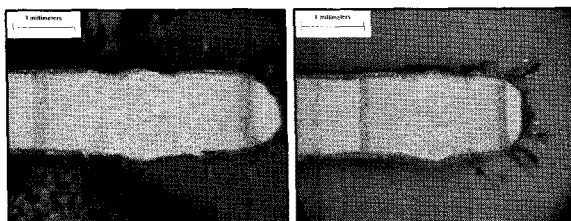


Fig. 11 Fracture location of tensile test specimen according to heat input value.

한편 보호가스 적용 용접 및 Al-Si 코팅층을 제거한 뒤 용접한 시험편의 인장강도 값도 Fig. 10과 같이 적용 변수와 무관하게 거의 유사한 강도를 나타내고 있는데, 본 결과는 hot stamping 판재의 레이저 용접 강도에 큰 영향을 미치지 않음을 판단할 수 있다.

3.4 겹치기용접 특성

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저를 이용하여 1.2t 두께를 갖는 hot stamping 강 of 레이저 겹치기 용접 시, Fig. 12와 같이 출력 3kW에 2m/min의 용접속도에서 양호한 비드형상을 나타내었다. 경도 측정결과는 Fig. 13와 같이 상 하판 모두 비슷한 경향을 나타냈으며, 하판의 열영향부 경도값이 약간 더 높게 나타났는데 이는 레이저가 조사되는 에너지 밀도의 차이로 인한 용융부 냉각속도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 경도 분포는 맞대기 용접과 마찬가지로 마르텐사이트 템퍼링 효과가 최대로 일어나는 영역에서의 경도값이 가장 낮게 나타났다.

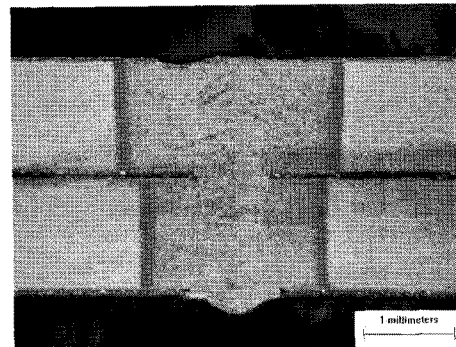


Fig. 12 Cross section of lap joint welding.

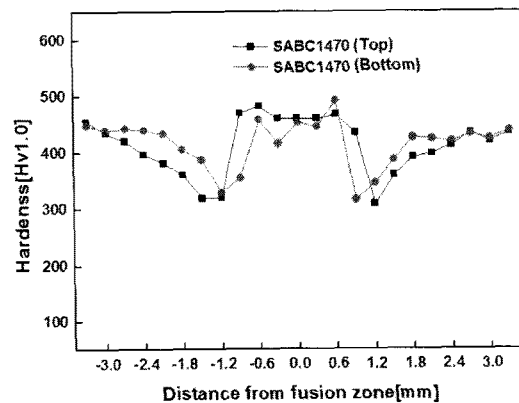


Fig. 13 Hardness distribution of upper and lower welded region.

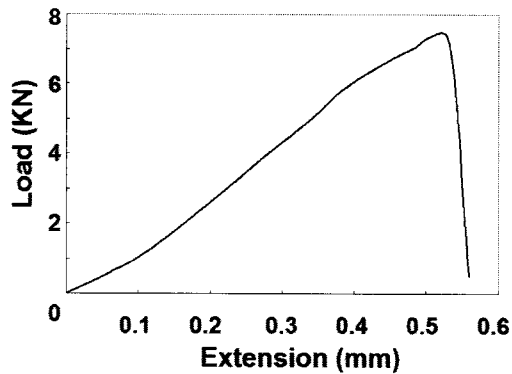


Fig. 14 Load-displacement diagram of the lap joint welding on hot stamping steel.

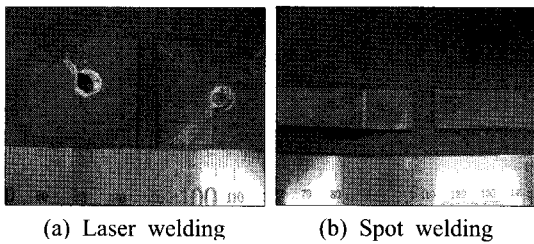


Fig. 15 Fracture location compared laser to spot welding.

4. 결론

3kW Nd:YAG 레이저를 이용한 hot stamping 판재의 맞대기 및 겹치기 용접을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접속도 2.0-5.0m/min일 때 완전용입이 발생한다.
- 2) 보호가스 유무 및 Al-Si 코팅층의 표면 연마에 관계없이 용입 및 인장강도의 경향은 비슷하게 나타났다.
- 3) 입열량과 관계없이 열영향부 연화가 발생하며, 입열이 증가할수록 그 영역이 넓어질 뿐 아니라 최저 경도값도 낮게 나타났다.
- 4) 열영향부 최저 경도값이 존재하는 부분은 템퍼드 마르텐사이트가 존재하며 맞대기 및 겹치기 용접부 모두에서 이 영역 파단이 발생하였다.
- 5) 용접부 인장특성을 볼 때, 용접부는 소성변형이 거의 없이 항복응력을 넘어선 후 바로 취성 파괴 형태로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 중소기업기술혁신개발 사업(과제번호:S1059187)의 일환으로 수행된 결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 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, 471-474 (in Korean), 2009.
- 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.