기 술 논 문

Al-Si 도금된 22MnB5강의 핫스탬핑 TWB 적용을 위한 레이저용접성 고찰

김 용*,† · 박 기 영* · 이 보 영**

*고등기술연구원 로봇/생산기술센터
**한국항공대학교 항공우주기계공학부

A Study on Laser Weldability of Al-Si Coated 22MnB5 Steel for TWB Hot Stamping

Yong Kim*,†, Ki-Young Park* and Bo-Young Lee*

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Eng., Yongin 449-863, Korea
**Dept. of Aerospace and Mechanical Eng. Korea Aerospace Univ., Goyang 412-791, Korea

†Corresponding author : welding@iae.re.kr
(Received November 27, 2012 ; Revised December 11, 2012 ; Accepted April 22, 2013)

Abstract

Recently the use of ultra high strength steels(UHSS) in structural and safety component is rapidly increasing in the automotive industry. Furthermore, it commonly use in tailor welded blank laser welding process before hot stamping to reduce lightweight vehicle. However TWB process is to be a problem about welded strength after hot stamping because it's welded before heat treatment. Therefore, in this study, laser welds of TWB after heat treatment were analyzed for changes in the characteristics, especially the impact on the oxidation and decarburization in order to prevent pre-coated Al-Si layer welds on the properties for intensive investigation. As a result, the degradation of the TWB weldments changes in the heat treatment conditions alone, without any pre-treatment of the coating layer has confirmed that there is a limitation on the improvement. Furthermore Al-Si elements are overall distributed on the weldment and it specially concentrated along the fusion line. Hardness value of Al-Si segregation area is less than 350Hv and tensile strength showed just 78~83% compared with substrate. Accordingly, we proved that both side Al-Si coating should be removed in order to ensure the strength of the substrate.

Key Words : Al-Si coating, Hot stamping, 22MnB5, HAZ softening, Dilution, TWB, Laser welding

1. 서 론

최근 유가상승에 따른 연비절감 및 CO_2 감축 등의 요구로 인해 자동차 업계에서 차체 경량화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히 차체 경량화는 전기자동차나 연료전지 자동차와 같은 미래형 자동차의 효율 향상을 위해서도 더욱 절실히 요구된다. 그러나 차량 경량화는 안전성이라는 중요한 요구사항을 동시에 만족하여야 하므로 그 한계를 극복하기 어려운 경우가 자주 발생한다. 이에 따라 최근 자동차 업계는 기존 적용되는 고강도강(HSS, high strength steel)에 비해 동일 두께에서 강도 및 성형성이 우수한 새로운 고강도강(AHSS, advanced high strength steel)을 개발하였으며 이 중 700MPa 이상의 강도를 갖는 초고강도 강판(UHSS, ultla high strength steel)으로 핫스탬핑(Hot stamping)강이 새롭게 주목을 받고 있다[1,2].

핫스탬핑강은 경화능이 우수한 보론(boron)강판을 900℃ 이상의 고온에서 열간성형을 실시하기 때문에 성형할 때 강도는 400~700MPa 정도로서 낮으나, 금형 안에서 급속냉각을 병행하여 1,500MPa 급의 강도를 최종 제품으로 얻을 수 있다. 이 기술은 유럽 철강 업체인 "ArcelorMittal사"에서 상용공법이 개발된 뒤 독일의 "ThyssenKrupp"와 설비 협력을 통해 전 세계에

빠르게 기술보급이 되고 있는 추세이다[3,4].

한편 레이저 용접은 타 용접법에 비해 용접속도가 빠르고 입열량이 적어 열변형이 작은 이점이 있고, 비드 외관이 미려할 뿐만 아니라 정밀성, 안정성이 높다. 이런 특성으로 인해 일본, 독일, 미국 등 자동차 선진국들은 이미 많은 부분에 레이저용접기술을 도입, 응용하고 있으며 국내에서도 기존 저항 점용접을 대체하기 위한 차세대 생산기술로서 각광받고 있다[5-7]. 용접기술은 차량의 안전성과 직결되는 기술로서 다양한 강재의 개발 발맞추어 적합한 용접공정이 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_2, Diode 및 Nd:YAG 레이저 용접 등에 관한 많은 연구가 진행되었다[8-13]. 또한 핫스탬핑강의 경우도 기존과 다른 용접특성을 나타내기 때문에 점용접에 대한 연구가 최근 들어 많이 진행되었으며[14], 점용접을 대체할 수 있는 레이저 겹치기 용접특성에 대한 연구결과도 다수 보고되어 있다[15,16]. 게다가 최근에는 레이저용접 기술과 핫스탬핑 열처리 기술의 장점을 조합하여 최적의 충돌특성을 갖는 이종두께 또는 이종소재에 대한 테일러드 블랭크 용접(TWB)에 관한 연구도 일부 보고되어 있다[17-19].

여기서 핫스탬핑강 TWB 공법은 다이퀜칭 전 미리 용접을 하게 되므로, 열처리 후 용접부의 물성확보에 대한 문제가 제기되고 있다. 특히 열처리 중 산화 및 탈탄 방지를 목적으로 미리 도금된 보론강 기지조직 표면의 Al-Si 도금층이 용접 중 용융부 내부에 혼입되어 용접부 강도를 저하시킨다고 알려져 있다[3]. 그러나 TWB 용접 후 핫스탬핑 공정에 대한 연구가 최근에야 이뤄짐에 따라 도금층 유입 유무에 따른 열처리 전후의 미세조직과 기계적 성질 등에 대한 체계적인 검토가 아직까지는 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 레이저 TWB 용접부의 열처리 전후 기계금속학적 특성 변화에 대해 분석하였으며, 특히 열처리 후 Al-Si 도금층의 혼입이 용접부 물성에 미치는 영향에 대해 집중적으로 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 재료

핫스탬핑 기술의 핵심은 고온 성형과 급랭에 의한 변태강화이므로 이에 사용되는 강재는 오스테나이트상에서 적절한 냉각속도에 의해 마르텐사이트상으로 변태될 수 있는 경화능이 향상된 화학 조성을 가져야 한다. 이 중 보론(B)의 경우 미량(0.001~0.003wt%) 첨가만으로도 강의 소입성(hardenability)이 현저히 향상되는 특징이 알려지면서 소입성 향상 원소로서 광범위하게 이용되고 있으며, 본 연구에 사용된 22MnB5강 또한 이와 같은 특성을 갖고 있다.

Table 1 Chemical compositions of material(wt%)

Materials	C	Mn	Si	P	S	B
22MnB5	0.23	1.18	0.22	0.017	0.002	0.002

Table 2 Mechanical properties of boron and hot stamped steel

Properties	As delivered	Hot stamped
Yield strength (MPa)	457	1,010
Tensile strength (MPa)	608	1,478
Elongation (%)	18	6
Vickers hardness (Hv)	220	480

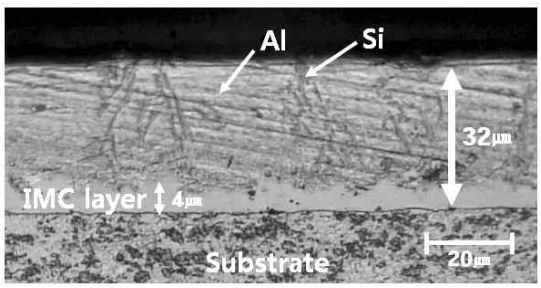


Fig. 1 Details of Al-Si coating layer before hot stamping

본 연구에 사용된 22MnB5강은 "ArcelorMittal사"에서 제조된 것으로서 그 화학조성은 Table 1과 같다. 한편 Table 2는 보론강의 핫스탬핑 공정 전후의 기계적 물성치를 나타내고 있으며 공정 후 신율이 저하되지만 인장강도 측면에서 1.5GPa급의 매우 우수한 기계적 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

한편 핫스탬핑 공법에 의한 성형 공정은 900℃ 이상의 가열공정을 수반하기 때문에 분위기 가스 등에 의한 산화 방지를 하지 않을 경우 강재 표면에 산화에 의한 스케일(scale) 생성 및 표면 탈탄 현상이 발생하게 된다. 그러므로 가열 전 강재 표면에 산화를 방지하기 위해 Al-Si 코팅을 하게 된다[1-4]. Fig. 1은 본 연구에 사용된 보론강의 핫스탬핑 전 코팅층을 OM으로 관찰한

결과로서 보론강 코팅층의 두께는 일반적으로 약 25~35㎛ 정도로 형성되어 있다.

2.2 시험편 제작

TWB 용접을 위한 레이저 발진기는 빔 직경 600㎛, 초점거리 200mm인 3kW CW Nd:YAG를 사용하였다. 소재는 200×100mm 크기로 준비하였으며 이음부는 용접 전 밀링가공을 하였다. 시험 편의상 1.4t 동종 두께 두 장을 맞대기 용접하였으며, 충분한 선행실험을 통해 최종적으로 최대출력 3kW에서 4m/min의 용접속도 적용 및 He 보호가스를 사용하여 Fig. 2와 같이 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

한편 열처리시험에서 가열로는 1,200℃ 까지 온도조절이 가능한 전기로를 사용하였으며, 가열로에서 일정 온도 또는 유지시간이 지난 후 급냉을 위해 편평한 금형사이에 넣고 가압하여 빠르고 균일하게 냉각시켰다. 또한 가열로에서 금형에 시편이 안착될 때까지의 대기 중 노출시간은 4~5초 사이로 일정하게 하였으며, 금형의 온도상승으로 인한 소재의 냉각속도 저하가 없도록 충분히 냉각하였다. 한편 가열 조건에 따른 인장강도를 위한 시험편은 KS B 0801 규격을 따라 제작하였으며, 모재 및 용접부의 강도를 동일한 시편에서 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 방법으로 시편을 채취하였다.

통상적으로 핫스탬핑 공정에서의 열처리 조건은 900~950℃ 사이의 온도에서 5~7min의 유지시간 후 수냉 다이에서 5~10초간 급속 퀜칭을 통해 제조되는 것으로 보고되어 있다[1-2]. 이에 따라 본 연구에서도 900℃ 온도와 5min 유지조건을 기준으로 동일한 조건으로 용접된 시험편의 열처리 조건에 따른 기계적 특성과 용접성을 평가하고자 Table 3과 같은 공정변수로 시험편을 제작하였다. 또한 Al-Si 코팅층이 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 일부 시험편의 경우 보론강 TWB 용접 전 기계적인 방법으로 미리 코팅층을 제거한 후 그 특성을 비교평가 하였다. 특성평가는 인장강도와 경도 그리고 미세조직 OM관찰을 통해 확인하였다.

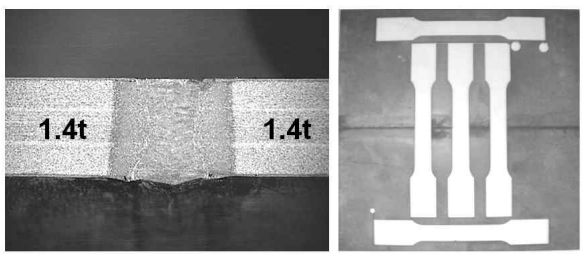


Fig. 2 Cross section view of laser welded butt joint and collecting of tensile specimen

Table 3 Heat treatment conditions of the 22MnB5 with respect to test parameter

	Parameter	Variable Range	Fixed value
1	Heating time	1, 3, 5, 7, 10, 20 (min)	900 ℃
2	Heating temperature	880, 900, 920, 950, 980, 1,050 (℃)	5min
3	Cooling time	Water cooling Air cooling Die press cooling (2, 5, 10, 20sec)	900 ℃ 5 min
3	Treatment of Ai-Si coating before welding	No treatment Upper side removal Both side removal	

3. 결과 및 고찰

3.1 핫스탬핑 전후 용접부 특성 비교

보론강판의 레이저용접 후 열처리를 통해 완성되는 핫스탬핑 TWB 부품의 특성을 확인하기 위해 최우선적으로 열처리 전후 용접부 변화에 대한 OM 관찰을 실시하였다. Fig. 3은 이에 따른 결과를 나타내고 있다. 열처리 전 보론강은 전형적으로 페라이트와 펄라이트로 구성된 조직을 나타내며, 비커스 경도는 약 Hv240 정도로 나타났다. 한편 보론강의 용접부의 경우 고속 저입열 레이저용접에 의한 급격한 용융/냉각 열 사이클을 받아 마르텐사이트 조직을 나타내고 있으며, 그 경도는 Hv520 정도로 측정되었다. 열영향부 또한 용접부와 비슷한 경도를 나타내었다. 보론강 용접부에서는 특히 용융선(fusion line)을 따라 집중적으로 Al-Si 도금층이 용접부 내로 혼입된 것을 볼 수 있으며, 용접금속 내에도 골고루 분포한 것을 확인할 수 있다.

한편 900℃ 온도에서 5분간 열처리 후 조직을 관찰한 결과, 모재는 잔류오스테나이트가 거의 보이지 않는 매우 촘촘한 침상의 마르텐사이트로 변태된 것을 볼 수 있으며 그 경도는 Hv510으로 급격히 증대되었다. 또한 보론강 상태에서 존재하던 열영향부와 모재와의 경계가 열처리를 통해 없어진 것을 볼 수 있었으며, 용융선 바로 바깥쪽의 경도값이 모재와 일치하는 것을 확인하였다. 그러나 용접부의 경우 Hv320 정도로 경도가 저하되었으며, 용융선을 포함한 용접부 전체에 걸쳐 백층(white area)이 분포하는 것을 확인하였고, 이러한 백층은 이미 여러 연구자들에 의해 Al-Si 화합물임이 판명되었다. 특히 B.Jung[17]의 연구 결과에 따르면 열처리 전 혼입된 Al-Si 화합물은 TEM 분석결과 $Fe_3(Al,Si)$ 상이며, 열처리 과정에서 Al 농도가 낮은 용접 중심부의 경우 α-페라이트상과 마르텐사이트, 베이나이트 조

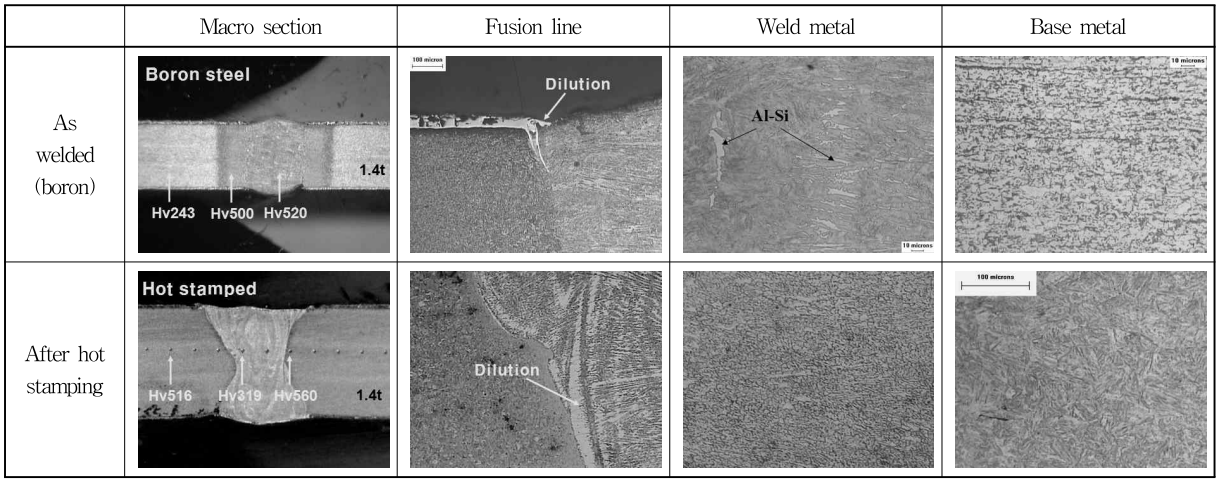


Fig. 3 Comparison of OM results between as welded boron steel and hot stamped steel

직이 발견되는 반면 Al 농도가 높은 본드라인 근처의 조직은 Al의 확산을 통해 δ-페라이트와 마르텐사이트의 2상 조직으로 변태하여 용접부의 강도를 연화시킨다고 주장하였다. 이러한 주장에 근거하여 Fig. 3의 열처리 전후 용접부 미세조직 변화를 살펴보면, 열처리 전 Al-Si 도금층이 레이저용접 과정을 거치면서 침상 마르텐사이트 조직과 혼재된 금속간화합물의 편석부로 존재하고 열처리 중 확산에 의해 구상 조직으로 형태가 변화된 것을 확인할 수 있다. 한편 본드라인 근처에서는 백층부의 편석이 용접 중심부보다 더욱 뚜렷이 발견되며, 이렇게 변태되어 형성된 백층부는 이미 여러 연구자들에 의해 밝혀진 바와 같이 취약한 강도특성을 보여 인장시험 시 파단 시작위치로 작용하게 될 것으로 충분히 예상할 수 있다.

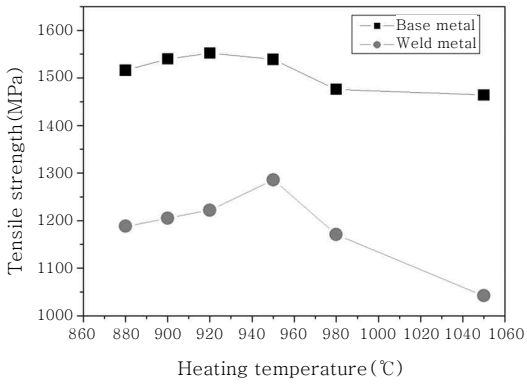
3.2 열처리 공정조건에 따른 강도특성

TWB 용접재의 열처리 공정조건 조절을 통하여 용접부의 강도저하를 최소화할 수 있는지를 확인하기 위하여 실제 Table.3과 같은 다양한 공정조건에서 열처리를 실시한 후 인장강도를 측정하였다. 우선적으로 열처리 시간을 5분으로 고정한 뒤 온도만 880~1,050℃로 변화시킨 후 급속 퀜칭을 통해 나온 결과는 Fig. 4(a)와 같다. 가열온도가 880~950℃사이에서는 온도가 올라감에 따라 모재 및 용접부의 인장강도 역시 증가하는 경향을 나타내었으며 그 이후에서는 점차 감소하였다. 일반적으로 모재의 경우 온도가 올라갈수록 오스테나이트 결정립 크기가 비대해져 그 내부에 형성된 마르텐사이트 결정이 조대화되었기 때문에 강도가 소폭 감소된 것으로 사료된다. 그러나 용접부의 경우 950℃ 이상 조건에서 강도 저하의 폭이 모재보다 더욱 뚜렷하였는데, 이는 결정립 조대화 뿐만 아니라 앞선 주장과 같이 더욱 높은 온도조건에서 Al의 확산이 더욱 활발하게 진행되고 결과적으로 연질의 페라이트가 보다 많이 형성되어 용접부의 강도저하가 발생된 것으로 추정된다.

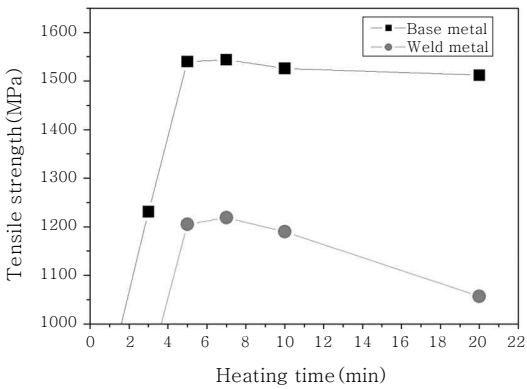
한편 열처리 온도를 900℃로 고정시킨 후 시간만 1~20분으로 변화시켜가며 시험편을 만든 후 인장강도 측정결과는 Fig. 4(b)와 같다. 가열온도가 3분 이하에서는 1,200MPa 이하의 낮은 강도를 나타내는데 이는 오스테나이트 변태가 완전히 일어나지 않은 상태에서 냉각을 시켰기 때문이다. 이에 따라 오스테나이트로의 완전 변태시간은 최소 5분으로 생각될 수 있으며, 10분까지는 거의 균일한 강도를 나타냈다. 이후 모재의 경우 앞선 온도변화 시험과 같이 오스테나이트 결정립이 조대해짐에 따라 약간의 강도저하가 발생되고 용접부의 추가적인 강도 저하 또한 확산 정도의 차이에 따른 강도저하로 판단할 수 있다. 이상의 열처리 조건과 페라이트 생성 정도에 관한 보다 정확한 상관관계를 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

한편 동일한 열처리 조건에서 냉각시간만 변화시키며 시험을 진행한 결과, 수냉을 제외한 다이 프레스 퀜칭 시간은 2~20s 모두 유사한 강도값을 나타내었다. 이는 다이에서 2s 이내에 마르텐사이트 변태가 모두 끝난다는 것을 의미한다. 참고로 수냉의 경우 1,600MPa 정도의 모재강도를 나타냈으며, 공냉의 경우는 기존 보론강의 강도와 유사한 650MPa로 측정되었다.

이상의 실험결과로부터, 본 연구에서는 900~950℃의 온도에서 5~7분의 유지시간이 가장 적절한 열처리 공정조건임을 확인하였다. 용접부의 강도는 모재의 강도와 비례하였고, 모재대비 76~83%의 강도를 나타냈다. 그러나 열처리 공정조건의 조절만으로는 용접부의 강도저하를 막을 수 없었으며, 결국 모재강도를 확보하



(a) Tensile strength according to heating temperature



(b) Tensile strength according to heating time

Fig. 4 Tensile strength of base metal and weld metal depends on various heat treatment condition

기 위해서는 도금층의 전처리가 필수적으로 요구됨을 확인하였다.

3.3 Al-Si 도금층의 영향

Al-Si 도금층의 혼입이 용접부 강도를 저하시키며, 충분한 강도확보를 위해선 적절한 방법을 통해 이음부의 코팅층을 미리 제거한 후 용접을 수행하여야 한다는 사실은 이미 여러 연구자들에 의해 밝혀졌다. 특히 W. Ehling[3]의 경우 펄스레이저를 이용하여 코팅층을 어블레이션(ablation) 후 용접하게 되면 성형성이 10~15% 정도 증가되며, 인장강도 측면에서는 큰 차이를 보이지 않으나 연신율이 5배 이상 향상된다고 보고하였다.

이를 참고하여 본 연구에서도 용접 전 이음부의 코팅층을 기계적 연마를 통해 완전히 제거한 뒤 용접 후 열처리를 통한 최종 강도를 확인하였다. 코팅층이 윗면만 제거된 것과 양면 모두 제거된 두 종류의 시험편을 준비하여 그 결과를 비교하였으며, 열처리 온도는 900℃ 및 950℃ 각각에 대해서 진행하였다. 이에 따른 시험결과는 Fig. 5에 제시하였다.

900℃로 열처리된 시험편의 결과를 비교해보면, 일

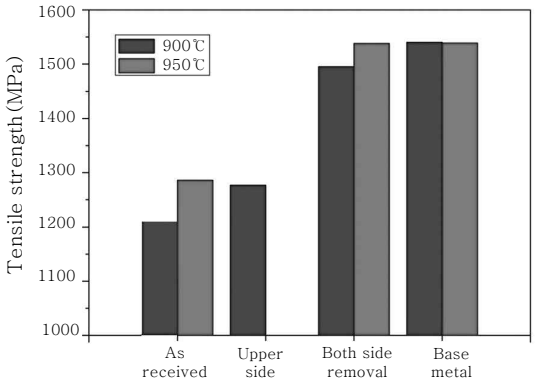


Fig. 5 Tensile strength depend on various coating treatment conditions

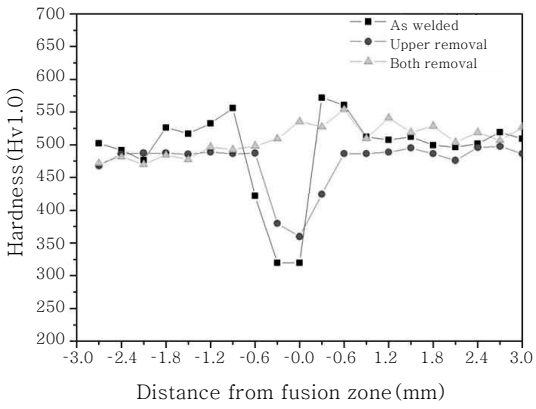


Fig. 6 Hardness distribution depend on various coating treatment conditions

단 양면의 코팅층을 제거한 후 용접한 경우 거의 모재강도와 동일한 강도를 나타내었다. 한편 도금층이 존재하는 경우는 모재대비 80% 정도의 강도를 나타내었으며, 한 면만 제거한 경우에도 강도는 소폭으로 증가하였지만 그 영향은 크지 않았다. 이러한 결과는 TWB 용접 적용 시 이음부는 반드시 양면 모두 제거되어야 한다는 것을 의미한다.

이러한 사실은 경도 측정결과에서도 확인할 수 있다. Fig. 6은 3종류의 시험편에 대한 용접부 경도측정 결과를 나타낸다. 양면 도금을 모두 제거한 경우 모재와 거의 동일한 경도를 나타내고 있으나, 한 면 또는 모두 제거하지 않은 경우의 경도는 Hv320의 매우 낮은 값을 나타낸다.

좀 더 세부적인 검토를 위해 도금층 제거 시편에 대한 미세조직을 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 상부코팅만 제거된 시편의 마크로 조직을 관찰한 결과 특이점을 발견할 수 있었는데, Al 편석부(백층 영역부)가 아래쪽에 치우쳐 있는 것을 확인하였다. 이는 상부코팅 제거 후 레이저 키홀 모드로 용접 시 용융

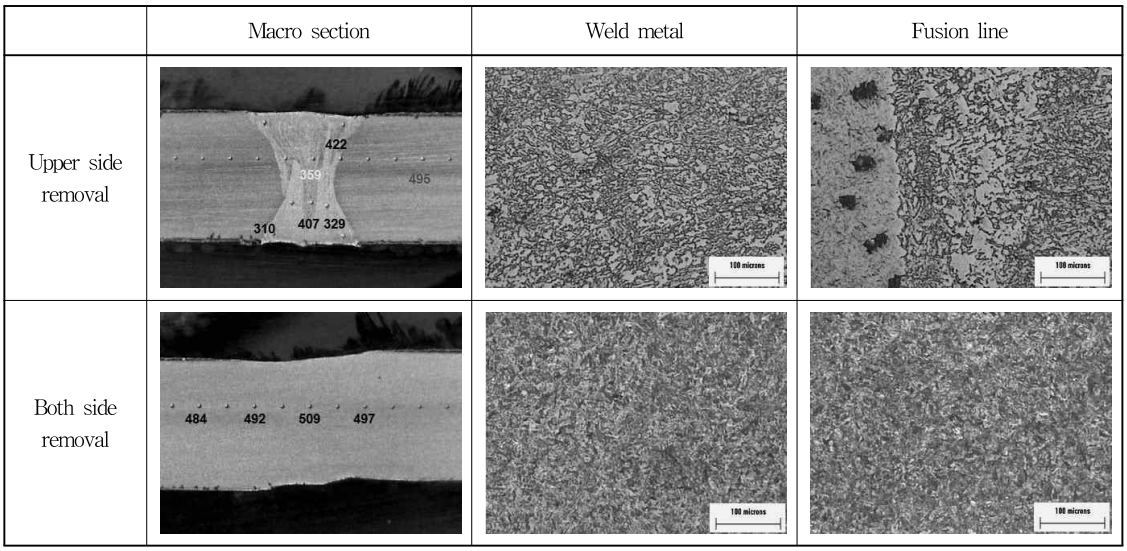


Fig. 7 Comparison of OM results between only removed upper side coating and both side removal specimen

지에서 충분한 대류(convection)가 발생하지 않고 급속 응고하여 하부에 존재하는 Al-Si 도금층이 골고루 희석되지 못하고 하부 쪽에만 집중적으로 편석되었기 때문으로 사료된다. 이러한 결과는 또한 상하부의 경도 분포를 통해서도 확인할 수 있는데, 용접 비드 상부에서의 경도(Hv420)가 모재(Hv500)보다는 낮지만 하부(Hv320)보다는 큰 값을 나타냈다. J.Moon[20]이 발표한 연구결과에서도 이와 유사한 주장을 하였는데, 상하부 중 제거되지 않은 쪽의 경도가 보다 낮게 측정되며 낮은 쪽에서의 페라이트 조직이 더욱 많이 발견된다고 하였다.

용접구역의 금속조직학적인 견지에서 보면 상부 도금층 제거 시편의 용접부 및 용융선 근처의 미세조직은 도금층을 제거하지 않은 시편(Fig. 3 참고)과 거의 유사한 형태를 나타내었으며, 앞서 언급한대로 열처리 중 Al, Si의 확산에 의해 마르텐사이트와 페라이트로 변태된 조직을 보였다. 그러나 양면 코팅을 모두 제거한 경우 용접부와 모재부의 구분없이 완전히 마르텐사이트로 변태되었으며, 이에 따라 금속 에칭이 일어나지 않았다. 이상의 결과로부터 보론강의 TWB 용접 적용 시 우수한 강도를 보증하기 위해서는 양면의 도금층이 모두 제거되어야 한다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 22MnB5 강의 레이저 TWB 용접에서 Al-Si 도금층의 혼입이 용접부 물성에 미치는 영향에 대해 집중적으로 관찰하고자 열처리 공정조건 및 도금층의 가공 여부를 주요 변수로 놓고 인장, 경도 및 미세조직관찰 결과를 비교분석 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) TWB 용접된 시험편의 핫스탬핑 전후 용접부 특성을 비교한 결과, 열처리 전 레이저용접 과정을 거치면서 침상 마르텐사이트 조직과 혼재된 금속간화합물의 편석부로 존재하던 Al-Si 도금층이 열처리 중 확산에 의해 구상 조직으로 형태가 변화된 것을 확인할 수 있다. 한편 본드라인 근처에서는 백층부의 편석은 용접 중심부보다 본드라인 근처에서 더욱 뚜렷이 발견되었다.

2) TWB 용접재의 열처리 공정조건 조절을 통하여 용접부의 강도저하를 최소화할 수 있는지를 시험하였으나, 어떠한 공정조건에서도 모재강도 이상을 극복하지 못하였으며 용접부의 강도는 모재대비 76~83%로 나타났다.

3) 도금층을 상부만 제거 후 그 특성을 검토한 결과, 제거되지 않은 하부 쪽에 Al 백층부의 편석이 집중되었으며, 기계적 강도 또한 많은 상승을 이뤄내지 못하였다. 이에 따라 보론강의 TWB 용접 적용 시 우수한 강도를 보증하기 위해서는 양면의 도금층이 모두 제거되어야 한다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2010년 지식경제부에서 주관한 “동남광역경제권선도산업 육성사업”의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Taylan Altan : Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, Part 1 : Process method and uses, Stamping Journal (2006)

2. H. Karbasian and A. E. Tekkaya : A review on hot stamping, Journal of Mater. Proc. Technology, 210 (2010), 2103-2118.
3. 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)
4. Y. Kim etc on. : Laser Welding Characteristics of 1.5GPa Grade Hot Stamping Steel for Automotive, Journal of KWJS, 28-6 (2010), 612-617 (in Korean)
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) (in Korean)
6. J. Suh, Y.H.Han : Laser welding in automotive industry, Journal of KWS, 12 (1994), 49-63 (in Korean)
7. A. Ribolla, G. L. Damoulis 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
8. Jeong Suh etc on. : Remote welding of automobile components using CO_2 laser and scanner, Journal of KWJS, 26-5 (2008) 506-510 (in Korean)
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_2 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_2 laser beam welding and formability of Zn-coated steel plates, Journal of KWS, 13-1 (1995), 577-587 (in Korean)
14. Hong Seok Choi etc on. : Optimization of resistance spot weld condition for single lap joint of hot stamped 22MnB5 by taking heating temperature and heating time into consideration, Journal of KSME-A, 34-10(2010), 1367-1375 (in Korean)
15. 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)
16. C. H. Kim etc on. : A study on the CO_2 laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application, Journal of AMME, 39-1, 2010
17. B. Jung etc on. : Effect of hot-stamping heat treatment on microstructure and hardness in TWB laser joints of Al-Si-coated boron steel and Zn -coated DP steel, Korean J. Met. Mater., 50-3 (2012), 224-232(in Korean)
18. Seok Hwan Hwang etc on. : A study on the properties of laser welded boron steel for hot stamping according to the heat treatment conditions, Journal of KSME-A, 36-3(2012) 319-324 (in Korean)
19. Y.I. Kim etc on. : Formability evaluation of tailor welded blanks of boron steel sheets by erichsen cupping test at elevated temperature, Journal of KSTP, 20-8 (2011) (in Korean)
20. J.H. Moon etc on. : Evaluation of mechanical characteristic of laser welded blank of a boron steel by using laser ablation of Al-Si coating layer, Journal of KSTP, 20-8 (2011) (in Korean)