

Al-Si 용융도금된 11%Cr 페라이트 스테인리스강, STS409L GTA 용접부의 미세조직과 경도

박태준* · 공종판* · 나혜성* · 강정운*[†] · 엄상호** · 김정길** · 우인수** · 이종섭**

*부산대학교 재료공학부

**POSCO 기술연구원

Microstructures and Hardness of Al-Si Coated 11%Cr Ferritic Stainless Steel, 409L GTA Welds

Tae-Jun Park*, Jong-Pan Kong*, Hye-Sung Na*, Chung-Yun Kang*[†], Sang-Ho Uhm**,
Jeong-Kil Kim**, In-Su Woo** and Jong-Sub Lee**

*Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-730, Korea

**Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

[†]Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received January 18, 2010 ; Revised February 4, 2010 ; Accepted February 9, 2010)

Abstract

Ferritic stainless steels, which have relatively small thermal expansion coefficient and excellent corrosion resistance, are increasingly being used in vehicle manufacturing, in order to increase the lifetime of exhaust manifold parts. But, there are limits on use because of the problem related to cosmetic resistance, corrosions of condensation and high temperature salt etc. So, Aluminum-coated stainless steel instead of ferritic stainless steel are utilized in these parts due to the improved properties.

In this investigation, Al-8wt% Si alloy coated 409L ferritic stainless steel was used as the base metal during Gas Tungsten Arc(GTA) welding. The effects of coated layer on the microstructure and hardness were investigated. Full penetration was obtained, when the welding current was higher than 90A and the welding speed was lower than 0.52m/min. Grain size was the largest in fusion zone and decreased from near HAZ to base metal. As welding speed increased, grain size of fusion zone decreased, and there was no big change in HAZ. Hardness had a peak value in the fusion zone and decreased from the bond line to the base metal. The highest hardness in the fusion zone resulted from the fine re-precipitation of the coarse TiN and Ti(C, N) existed in the base metal during melting and solidification process and the presence of fine Al₂O₃ and SiO₂ formed by the migration of the elements, Al and Si, from the melted coating layer into the fusion zone.

Key Words : Ferritic stainless steel, Aluminized stainless steel, GTAW, Microstructure, Hardness

1. 서 론

세계적인 환경문제와 자원고갈 문제가 심각해짐에 따라 자동차의 연비 개선과 부품의 수명증대가 요구되고 있다. 이에 기존의 오스테나이트계 스테인리스강을 대

체해 열팽창 계수가 작고 내식성이 우수한 페라이트계 스테인리스강의 사용이 확대 되었다. 특히 비교적 가격이 저렴한 409L이 사용되어 왔다. 409L의 경우 표면 변색, 응축수 부식 및 고온 염 부식 문제로 인해 사용상의 한계를 가지고 있다. 이러한 제품 특성상의 문제점을 개선할 수 있는 대안으로 알루미늄 도금 409L 강

판이 개발되어 자동차 배기계 부품으로 적용되고 있다¹⁾. 초기 도금층 조성은 순수 Al이었으나, matrix와 도금층 사이에 두꺼운 intermetallic compound (IMC) 층이 형성되어 성형성이 저하되는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 기존의 순수 Al 도금층에 5~10wt% Si를 첨가 하여 IMC 발생을 감소시켜 성형성을 향상 시킨 연구가 진행되어 왔다²⁾.

한편, 일반적인 페라이트 스테인리스강 409L에 Gas Tungsten Arc(GTA) 용접 적용 시 모재의 가공성이 우수함에도 불구하고 용접부의 결정립 조대화 및 경화현상에 의해 가공성이 확보가 되지 않는다고 보고되고 있다. 최근에는 모재 자체의 성분을 변화시켜 가공성을 향상 시킨 연구 사례가 있다³⁾. 알루미늄 도금 페라이트 스테인리스 409L의 경우 제조사인 AK steel 사에 의하면 용접부 내에 알루미늄의 농화가 발생하여 적절한 Filler Wire 사용 없이는 GTA 용접을 추천하지 않고 있다⁴⁾. 이에 대한 체계적인 연구내용은 보고된 바가 없으며, 알루미늄 도금 강판의 GTA 용접성에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 Al-8wt% Si 합금으로 용융도금된 페라이트 스테인리스강 409L의 GTA 용접 적용 시 도금층이 용융부로 혼입됨에 따라 용접부의 조성을 변화 시킴으로써 용접부의 미세조직 및 경도에 미치는 도금층의 영향을 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구에서는 두께 1.2mm 냉연판재인 11%Cr강에, Ti을 첨가한 페라이트계 스테인리스강 409L에 Al-8wt% Si합금을 25 μ m 두께로 양면에 용융도금된 강을 사용하였다.

GTA 용접은 최대 용접전류 350A급의 DC type 용접기를 사용하였으며, 비드언플레이트(bead on plate)로 실시하였다. 용접조건은 텅스텐 전극 직경 2.4mm, 전극 선단각 60°, 아크 길이 1.5mm, 보호가스 Ar (15 l/min)로 고정하고, 용접전류 60~100A, 용접속도 0.32~0.64m/min 범위에서 변화시켰다.

미세조직은 연마 후 Vilella's (Picric acid 10g+HCl 5ml+methanol 100ml)용액으로 부식하고 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였고, 상의 성분은 EDX 및 EPMA를 사용하여 분석하였다. 또한 용접부 내의 미세한 석출물은 탄소레플리카(Carbon Replica)법으로 추출하고, TEM으로 분석하였다.

경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 하중 300g, 유지시간 10초로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재와 용접부의 미세조직

Fig. 1은 Al-Si 용융도금된 409L단면을 폴리싱 상태로 관찰한 것으로, 코팅층은 균일하게 형성되어 있으며, 두께가 약 25 μ m이었다. Fig. 2는 도금된 409L 표면(a)과, 도금되지 않은 409L 표면(b)에 대하여 XRD로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 순수 409L 표면과 도금층 표면의 피크를 비교하여 보면, 도금층은 Al 이외에 약간의 Al₂O₃, SiO₂ 및 Al₂SiO₃ 산화물이 함께 존재함을 알 수 있다.

Fig. 3은 모재의 전형적인 광학현미경 조직(a), SEM조직(b) 및 석출물(c, e)에 대하여 EDX로 분석한 결과(d, f)를 나타낸 것이다. 조대한 석출물들(화살표)은 입내와 입계에 존재하고, 이들 상은 EDX 분석 결과로부터 Ti을 주체로 하는 TiN과 Ti(N,C)임을 알 수 있으며, 아주 미세한 생성물들도 존재하지만, EDX로 분석되지 않아 어떤 상인지 확인할 수 없었다.

적정 용접조건을 선정하기 위하여, 용접속도를 0.32m/min로 고정하고 용접전류를 변화시켜 용접한 후 비드단면을 통하여 용입 정도를 조사하였다. Fig. 4는 용접전류

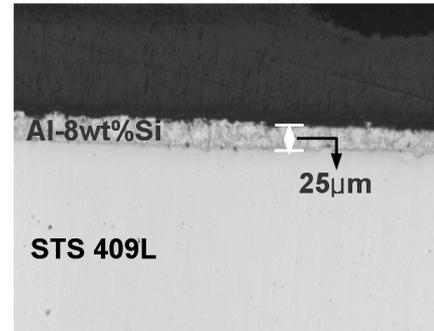


Fig. 1 Cross section of Al coated 409L

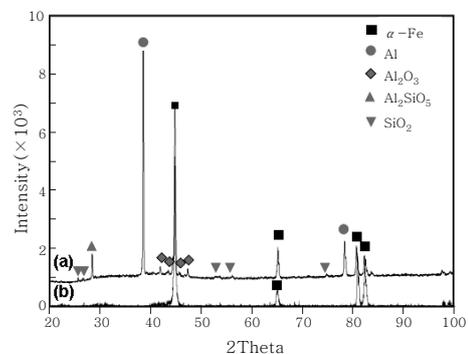


Fig. 2 Results of XRD pattern on surface of (a) Al coated 409L and (b) STS 409L stainless steel

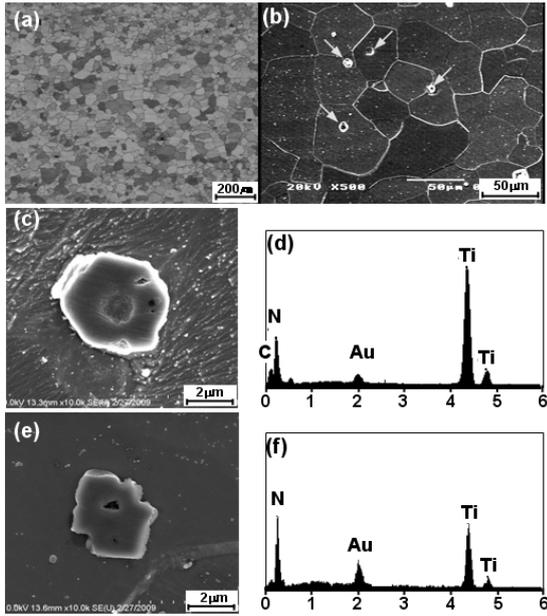


Fig. 3 Optical (a), SEM microstructures (b, c, e) and results(d,f) of EDX analysis for coarse precipitate in (c) and (e)

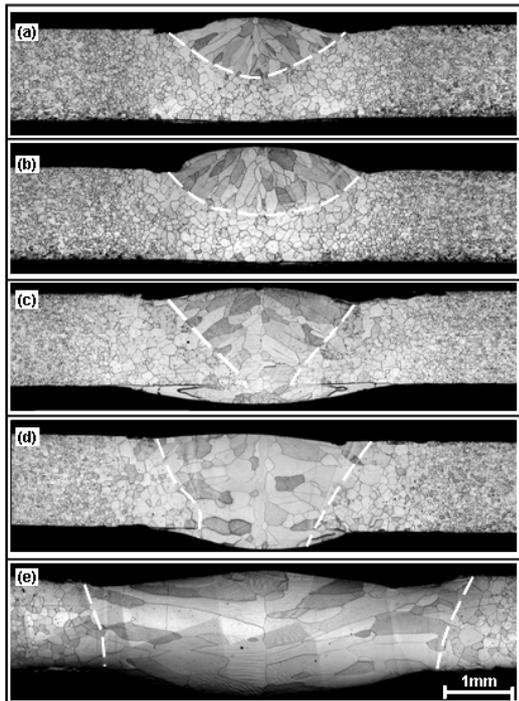


Fig. 4 Cross-section microstructures of bead in joints welded by various welding current at welding speed of 0.32m/min. (a) 60A, (b) 70A, (c) 80A (d) 90A, (e) 100A

를 변화에 따른 비드 단면 조직의 변화를 나타낸 것으로, 90A 이상의 용접전류에서 완전용입이 됨을 알 수 있다. 이 결과로부터, 용접전류를 90A로 고정하고, 용

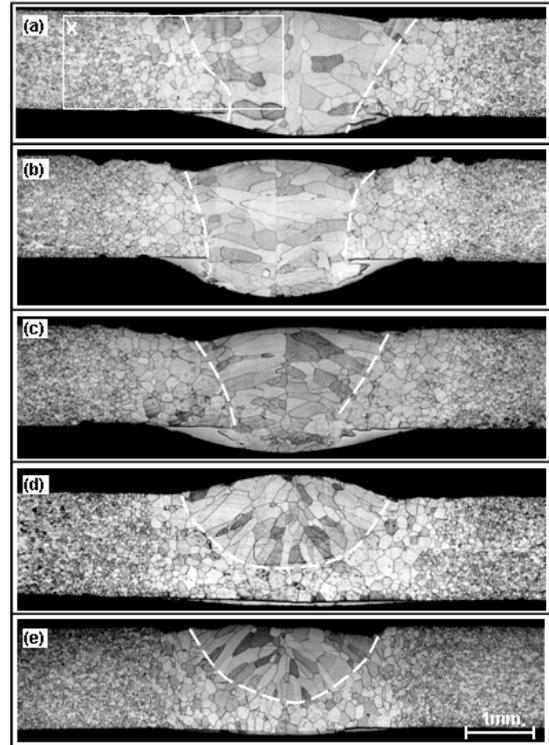


Fig. 5 Cross-section microstructures of bead in joints welded by various welding speed at welding current of 90A. (a) 0.32m/min, (b) 0.42m/min, (c) 0.52m/min (d) 0.60m/min (e) 0.64m/min

접속도 변화에 따른 비드 단면을 검토하여 보았다. Fig. 5는 그 결과를 나타낸 것이다. 용접속도가 0.52m/min 이하에서는 완전용입이 일어남을 볼 수 있다. 합금 도금층 내에 산화물이 포함되어 있음에도 불구하고, 용접부에는 균열과 기공과 같은 결함이 검출되지 않았다.

한편 Al-8wt%Si 도금층이 용접 후에 어떻게 분포하는지를 알아보기 위하여, EPMA로 Al과 Si의 분포를 분석하여 보았다. Fig. 6은 Fig. 5에 표시한 □ 영역을 Al 및 Si에 대하여 면분석한 결과를 나타낸 것이다. Al은 모재에는 없으나 용접부에는 농화되어 있고, Si은 모재 및 용접부에 존재하나 용접부의 농도가 높다. Fig. 7은 모재와 용접부를 EPMA로 Al, Si, O를 정

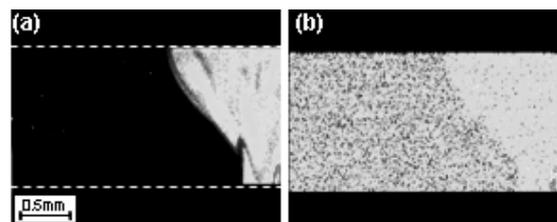


Fig. 6 Cross section of bead and results area analysis for Al and Si by EPMA. (a) Al (b) Si

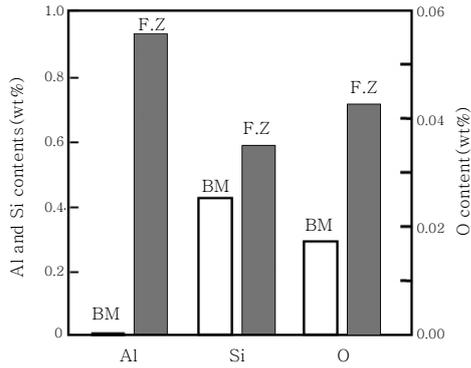


Fig. 7 Aluminum, silicon and oxygen contents in base metal and different the welds

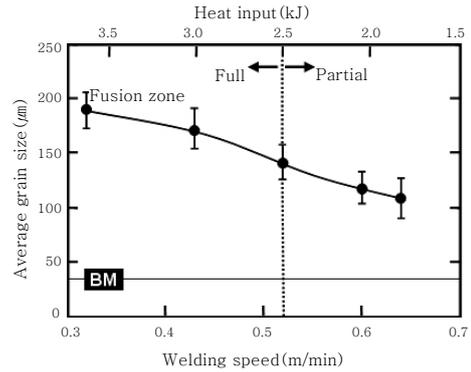


Fig. 9 Comparison of grain size in the fusion zone and the base metal

량 분석하여 비교한 것이다. 이 결과로부터 용접부가 모재보다 Al, Si 및 산소의 농도가 높으며 Al은 약 1%, Si은 약 0.6%와 산소가 0.04% 정도 함유되어 있다. 이러한 결과로서 용접 시 도금층이 용융되어 용접부 내에 다량 혼입되었음을 알 수 있다. 용접부가 모재와 Al, Si, 산소의 농도가 높기 때문에 미세조직도 크게 다를 것으로 예상된다.

Al 코팅층이 존재함으로써 용접부의 미세조직에 어떤 영향을 미치는가를 검토하기 위하여, 대표적으로 용접 전류 90A에서 용접속도 0.32m/min로 용접한 용접재를 선택하여, 광학현미경과 SEM으로 상세히 관찰하였다. Fig. 8은 용접비드 중앙부의 전형적인 광학현미경 조직(a)과 (a)에 표시한 각 영역, 즉 모재 근처의 HAZ(b), 본드라인 근처의 HAZ(c)와 용융부(d)와 용융부 중앙(e)의 SEM 조직을 나타낸 것이다. 결정립 크기는 용융부가 가장 조대하고, 본드라인 근처 HAZ에서 모재 쪽으로 갈수록 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 영역에 따른 결정립 크기가 변화하는 경향은 용접

속도와 관계없이 유사하였으므로, 용접속도에 따른 각 영역의 평균 결정립 크기 변화를 정량화 하였다. Fig. 9는 그 결과를 나타낸 것으로, 용접속도가 증가할수록 용융부의 결정립 크기는 감소하였다. 이러한 이유는 용접속도가 증가할수록 용융풀(fusion pool)의 크기가 감소되며 이에 따라 냉각속도가 빨라지기 때문에 미세화 되는 것으로 생각된다.

용접부의 석출물 분포(Fig. 8)를 모재(Fig. 3)와 비교하여 보면, HAZ에서는 모재와 거의 유사한 조대한 생성물이 존재하지만((b), (c)), 용융부에서는 조대한 석출물은 거의 보이지 않고((d), (e)), 미세한 생성물만이 존재하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 HAZ, (c)와 (d)는 용융부에 존재하는 대표적인 석출물의 SEM조직과 EDX 분석결과를 나타낸 것이다. 이 분석 결과로부터, HAZ에 존재하는 석출물은 모재와 동일한 TiN과 Ti(N,C)이며, 용융부는 미세한 TiN과 Al 산화물이 존재하는 것을 알 수 있다. 용융부에 존재하는 미세한 생성물을 보

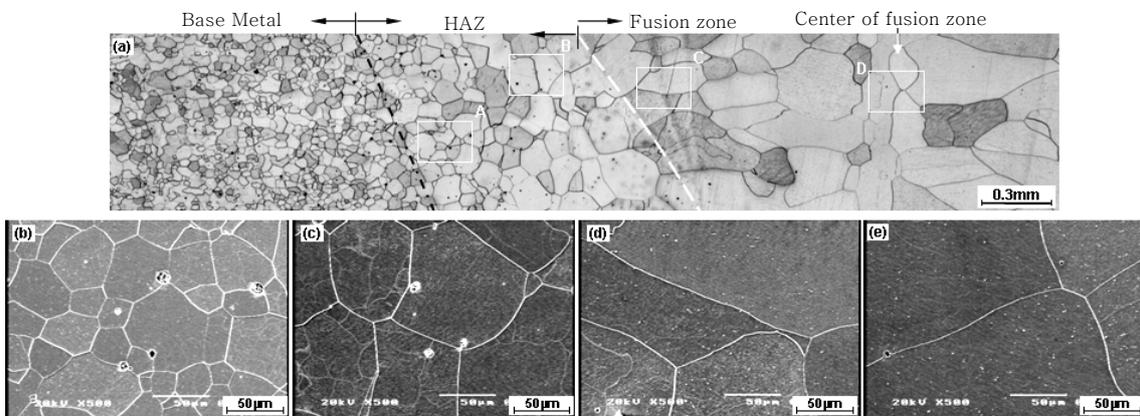


Fig. 8 Optical (a) and SEM microstructures near weld in Al coated 409L welded with welding speed of 0.32mm/s at 90A. (b) A(HAZ near base metal) (c) B(HAZ near bond line), (d) C(Fusion zone near bond line) (e) D(Center of fusion zone)

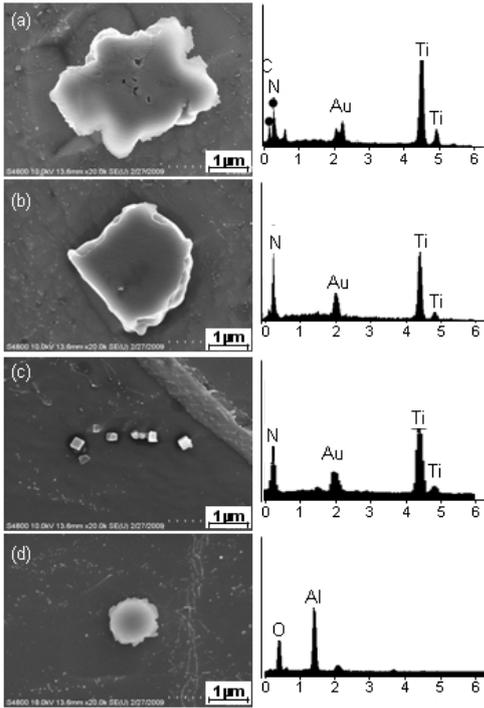


Fig. 10 SEM and EDX analyses of typical precipitates in various the regions of weld. (a)HAZ, (b)HAZ, (c)Fusion Zone, (d)Fusion Zone

다 상세하게 검토하기 위하여 TEM으로 관찰하였다. Fig. 11은 용융부에 형성된 생성물들에 대하여 TEM으로 관찰한 미세석출물의 EDX 분석결과, 회절 패턴, 그리고 해석결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터, Fig.10의 결과와 동일하게 TiN과 TiC가 관찰되고, Al₂O₃ 이외에 SEM에서 관찰하기가 어려운 아주 미세한 SiO₂도 존재함을 알 수 있다.

HAZ에 형성된 상이 모재의 것과 동일하지만, 용융부의 상이 모재의 것과 크기 및 종류가 다른 이유를 고찰하면 다음과 같다. 용접과정에서 모재에 존재하던 Ti계 질화물 및 탄질화물이 용융될 뿐만 아니라, Al-Si 코팅 층도 용융되고, 용접부에서 액상상태로 혼합된 후 응고

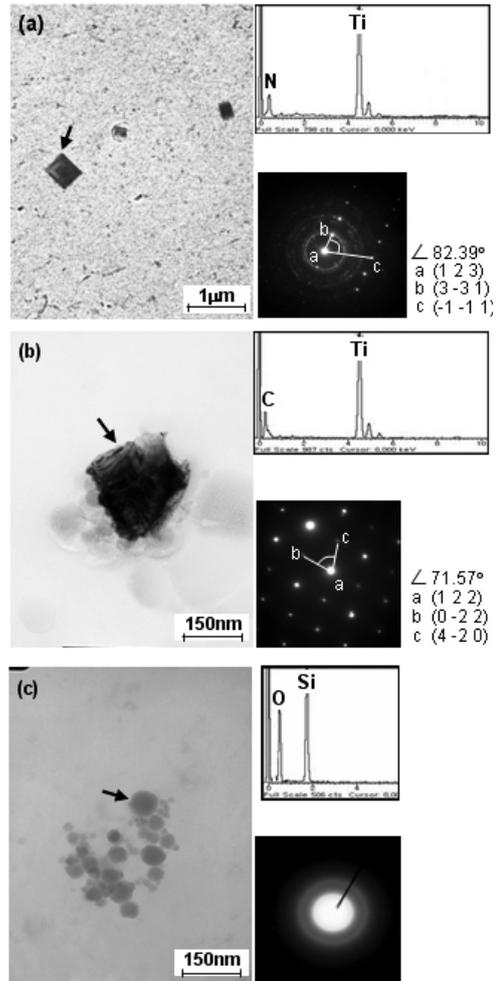


Fig. 11 TEM structures, diffraction patterns and its key diagrams taking from of various phases in the fusion zone. (a) TiN, (b) TiC, (c) SiO₂

된다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 Al과 Si는 용융부에 농화된다. 한편 Fe-Al 및 Fe-Si 합금 상태를 보면, 상온에서 Al의 고용도는 약 11%, Si의 고용도는 약 25%로 아주 높다.

Fig. 12는 온도의 변화에 따른 질화물, 탄화물 및

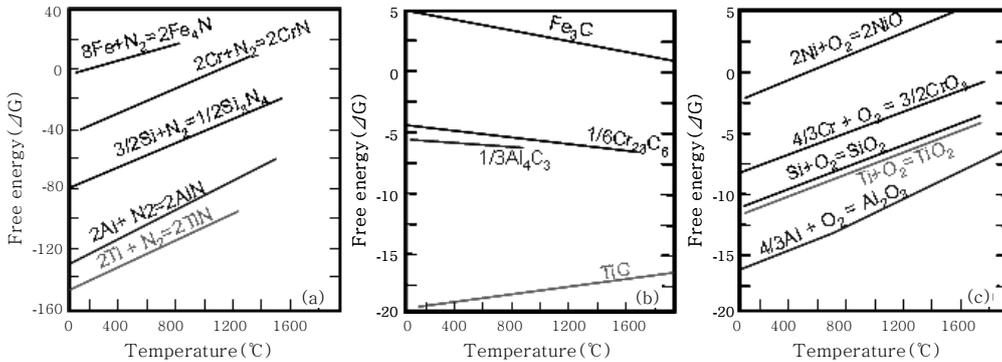


Fig. 12 Free energy for formation of nitride, carbide, and oxide with temperature.

산화물의 형성에 필요한 자유에너지 변화를 나타낸 것이다⁵⁻⁶). Al과 Si의 탄화물 혹은 질화물 형성에 필요한 자유에너지가 Ti보다 높지만, 산화물 형성에 필요한 자유에너지는 Ti보다 낮다. 따라서 용융부로 용해된 Al과 Si은 대부분 고용하고, 일부는 Al₂O₃, SiO₂로 생성되며, 모재에 존재하던 Ti계 질화물 및 탄질화물은 용접 시 용융한 후, 냉각 중에 다시 정출 또는 석출된다. 용접의 경우, 냉각속도가 빠른 편이므로, 모재 것보다 미세하게 형성되는 것으로 생각된다.

3.2 용접부의 경도

Fig. 13은 용접전류 90A에서 용접속도 0.32m/min와 0.43m/min으로 GTA 용접한 용접부에 대해 용접 중심선을 기준으로 150 μ m간격으로 비커스 미소경도를 측정하여 정리한 것이다. 두 조건의 용접부의 경도분포를 살펴보면, 용융부의 경도가 가장 높고, 본드라인에서 모재 쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보인다. 시험한 모든 용접속도의 경도분포는 모두 유사한 경향을 나타내었으므로, 용접속도에 따른 최대경도 변화만을 조사하여 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 용융부의 최고 경도는 용접속도의 증가에 따라 약간 증가하였다. 용융부의 경우, 모재에 존재하던 모든 TiN 및 Ti(C, N)가 용융되고, 용접 후 냉각과정에서 Fig. 8 (d)와(e) 및 Fig. 10 (c)와 (d) 및 Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 미세한 TiN 혹은 TiC가 균일하게 형성됨과 더불어 Al과 Si이 다량 고용되고, 일부는 Al₂O₃ 및 SiO₂와 같은 미세한 산화물이 형성되기 때문에 경도가 증가하는 것으로 생각된다. 또한 용접속도가 증가할수록 경도가 증가하는 것은 전술한 바와 같이, 용융풀의 크기가 감소함으로써, 냉각속도가

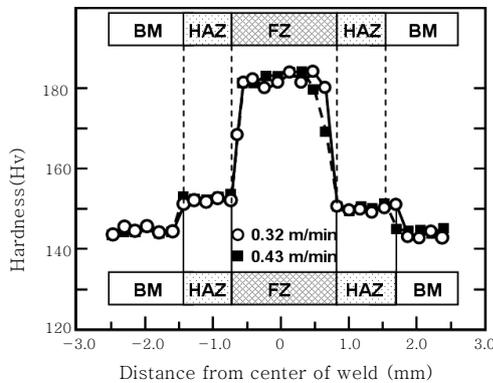


Fig. 13 Hardness distribution near welded zone of Al coated 409L at welding speeds of 0.32m/min and 0.43m/min

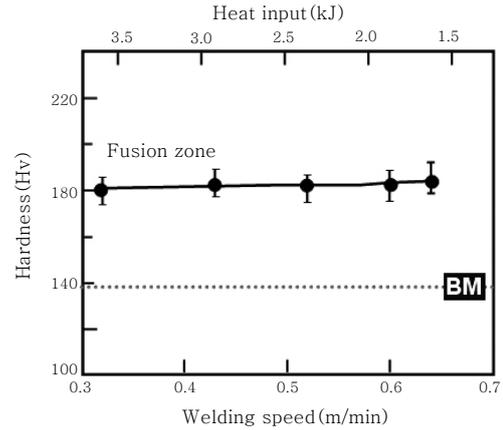


Fig. 14 Variations of average hardness in fusion zone with welding speed

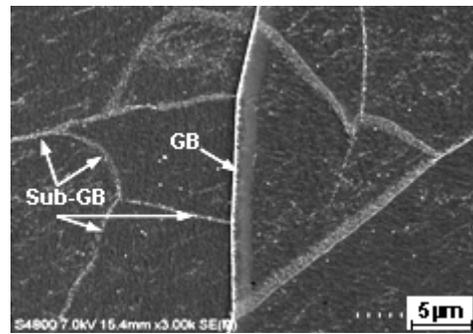


Fig. 15 Subgrain and grain boundary in HAZ

증가하여 결정립이 미세해지기 때문인 것으로 생각된다. HAZ에서는 모재보다 다소 조대하고, 석출물 크기 및 분포에 큰 차가 없음에도 불구하고, 일반적인 현상과 반대로 경도가 약간 증가하는 것이 특징이다. 이러한 이유는 HAZ의 미세조직을 확대하여 결정립을 자세히 관찰하여 보면, Fig. 15와 같이 페라이트 결정립 내에 미세한 아결정립(subgrain)이 존재하기 때문에 경도가 모재보다 다소 높은 것으로 생각된다. 이러한 아결정립은 용접과정 용융 및 응고과정에서 HAZ에 잔류응력이 발생함과 동시에 고온재결정 현상, 즉 동적 재결정현상이 발생하여 형성되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

자동차 배기계용으로 사용되는 Al-8wt%Si 합금으로 용융도금된 페라이트계 스테인리스강을 GTA 용접한 경우, 용융도금층이 용접부의 미세조직과 경도에 어떤 영향을 미치는가에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 광학현미경 배율 관찰 범위에서 결정립 크기는 응고조직인 용융부가 가장 조대하고, 본드라인 근처 HAZ에서 모재 쪽으로 갈수록 크기가 작아졌다. 그러나 고배율 SEM관찰 결과, HAZ의 페라이트 결정립 내부에 미세한 아결정립이 형성되어 있었다. 이것은 용접과정에서 발생한 잔류응력의 존재와 재결정 현상, 즉 동적 재결정에 의해 아결정립이 형성되는 것으로 생각된다.

2) 도금층에 존재하던 Al, Si, O는 용융부에서만 혼입되므로, HAZ는 상변화가 거의 없이 모재와 거의 유사하게 조대한 TiN과 Ti(N,C)과 분석이 어려운 미세한 상으로 구성되어 있었다. 용융부는 도금층의 Al, Si 및 O에 의한 상변화와 모재 중에 존재하던 Ti계 화합물의 용융 후 재석출에 의해 미세화되는 상변화가 발생하였다. 혼입된 Al과 Si은 Ti보다 탄화물 및 질화물을 형성하는 자유에너지가 높지만, 산화물 형성하는 에너지가 낮을 뿐만 아니라, 강에서 고용도가 높기 때문에, 대부분 고용하고, 일부는 미세한 Al₂O₃와 나노크기의 SiO₂를 형성하였다.

3) 용융부의 경도가 가장 높고, 본드라인에서 모재 쪽으로 갈수록 낮았다. 용융부의 경도가 가장 높은 이유는 모재에 존재하던 조대한 TiN 및 Ti(C, N)가 용융 후 미세하게 재석출되고, 도금층의 Al과 Si이 다량 고용되고, 일부는 Al₂O₃ 및 SiO₂와 같은 미세한 산화물이 형성되기 때문인 것으로 생각되었다.

4) HAZ가 모재보다 다소 결정립이 조대하고, 석출물 크기 및 분포도 모재와 거의 유사함에도 불구하고, 모재보다 경도가 약간 높은 이유는 동적 재결정현상에 의해 페라이트 입내에 아주 미세한 아결정립의 형성, 즉 잔류응력의 발생과 결정립 미세화에 기인하는 것으로 생각되었다.

감사의 글

본 연구는 (주)포스코 및 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (No. R15-2006-022-02004-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Donaldson Company, Product Literature, Medium- and Heavy-Duty Exhaust Products, 2007, 147
2. The corrosion resistance properties of weather resistant alstar, Nisshin Steel Technical information
3. I.S Woo, W.B Lee, J.G Kim, S.H Uhm, J.B Lee, Improvement of Low Temperature Formability in 11Cr Ferritic Stainless Steel GTA Welds, Proceeding of Autumn Meeting of KWJS, **48** (2007), 135-137 (in Korean)
4. Aluminized Steel Type1 Stainless 409 and 439, Ak steel corporation product data, Alum-409-439-B-08-01-07 (2007)
5. S. R. Shatynski, *Oxid. Met.*, 13, 105(1979)
6. T. B. Reed, Free Energy of Formation of Binary Compounds, MIT Press, Cambridge, MA(1971)