

마찰 육성법을 이용한 S45C 탄소강에 대한 STS304의 코팅층 특성 평가

노중석* · 조현진** · 김홍주** · 천창근** · 장웅성**

*주식회사 태광테크 기술연구소

**포항산업과학연구원 용접센터

The Evaluation of STS304 Coating Layer on S45C Substrate by Friction Surfacing Process

Joong-Suk Noh*, Houn-Jin Cho**, Heung-Ju Kim**, Chang-Gun Chun** and Woong-Seong Chang**

*R&D center, TaeKwangTech Co., LTD, Venture building 2, Technopark, Pohang 790-834, Korea

**Welding research center, RIST, Pohang 790-330, Korea

Abstract

Friction surfacing of STS304 consumable rod on S45C substrate was investigated by microstructural observation and mechanical tests. STS304 layer formed a strongly-bonded thick layer under a wide range of surfacing conditions. The highest coating efficiency was obtained in the condition of 1000rpm-2.5mm/sec-2.5mm/sec. The hardness distribution showed the peak value in the boundary layer and as the consumable rotation speed increased, the boundary layer also hardness increasing. As the consumable rotation speed and the traveling speed increased, the coating efficiency tended to decrease. On the other hand, as the feeding speed increased, the coating efficiency appeared to be increased. The new Fe-Cr-Ni alloy layer is showed in the interface layer on 5~15 μ m width. After friction surfacing, corrosion resistance of STS 304 surfacing layers were equaled to that of STS304 consumable rod.

* Corresponding author : jsnoh@a-tkt.co.kr

(Received July 25, 2005)

Key Words : Friction surfacing, STS304 consumable rod, S45C substrate, Hardness, Coating efficiency

1. 서 론

모재에 또 다른 특성을 부여하기 위해 코팅이 필요할 경우, 이용할 수 있는 공정은 수 mm 두께의 육성을 위한 오버레이 육성뿐만 아니라 화학적 증착(CVD)과 물리적 증착(PVD)과 같은 얇은 육성층을 형성하는 방법등이 있다. 수 mm정도의 두께를 가지는 육성층의 형성은 스프레이 또는 폭발 용접으로 가능하지만, 스프레이 된 육성층은 낮은 접착강도를 가질 뿐만 아니라 기공도가 높은 단점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서, 저압 스프레이 또는 폭발 스프레이와 같이 고속으로 입자를 이송하는 공정과 PTA 육성 용접, 레이저 스프레이등과 같은 높은 에너지 밀도를 이용하는 공정이 개발되었지만, 이러한 방법들 역시 용융에 기초를 둔 방법들이므로 근본적으로 희석률과 기공률이 높

고 낮은 접착강도, 모재변형, 모재와 육성층의 특성 변화, 취약한 작업 환경등이 형성됨으로 항상 똑같은 문제를 가지게 된다¹⁾.

마찰 육성법은 1941년 마찰용접이 개발이 되면서 그 유사 기술로 등장하여 1959년부터 연구가 시작되었다. 그러나, 용융프로세스의 연구로 인해 마찰 관련 연구의 진행이 거의 이루어지지 못하다가 1991년 TWI에서 마찰 교반 접합을 개발하면서 마찰 프로세스가 다시 주목을 받기 시작하였다. 이로 인해 마찰 육성법도 약 10년전부터 다시 연구가 시작되었다²⁾.

마찰 육성은 소모성 육성봉을 일정한 속도로 회전시킨 다음 적절한 속도로 이동시키면서 축하중을 주게 되면 육성봉이 모재와의 마찰에 의해 마찰열이 발생되고 모재와 육성봉의 접합계면에서 소성 변형층이 형성되어 모재에 육성되는 공정으로서 낮은 희석률과 기공률, 열영향부 및 변형 최소화, 매우 우수한 기계적 특성, 육

성재와 모재의 고유특성 유지등의 이점이 있다.

따라서 본 논문에서는 자체 제작한 위치 및 하중 제어 가능한 마찰 육성 시스템을 이용하여 우수한 내식성을 가지는 육성층의 형성을 위한 마찰 육성 공정 확립, 코팅 메카니즘 규명 및 야금학적 분석을 통하여 상용화 가능한 조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 모재는 가장 가격이 저렴하고 손쉽게 구입할 수 있는 S45C 탄소강을 사용하였고 육성봉은 내식성 향상을 위해 STS304를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 합금의 조성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

마찰 육성 공정은 그림 1과 같이 200×150×10t 의 S45C plate 에 20φ의 STS304 소모성 육성봉을 사용하여 시계 반대 방향으로 회전시킨 뒤 각각의 조건으로 1패스 육성하였다. 마찰 육성 공정의 주요 변수인 육성

봉 회전속도(Rotation speed), 이동속도(Traveling speed), 피딩속도(Feeding speed)는 Table 3에 나타내었다.

육성층 미세조직은 광학현미경을 이용하여 관찰하였고 육성층은 왕수, 모재는 nital 3% 부식액을 사용하였다. 또한 접합부 내의 결함부분과 석출물, 파단면의 성분을 분석하기 위해서 SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)를 이용하였다. 경도는 마이크로 비커스를 이용하여 하중 500g, 시간 10sec를 주어 측정하였으며 접합면의 희석률을 측정하기 위하여 EPMA (Electron Micro Probe Analysis)를 이용해 선분석을 실시하였다. 포텐쇼스태트/갈바노스태트를 이용하여 분극 특성 시험을 실시한 후 육성층의 내식성을 평가하였다. 측정에 사용된 기준전극(reference electrode)은 포화 크로멜전극(SCE), 보조전극(counter electrode)은 고밀도 탄소봉을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

육성봉 회전속도와 이동 속도, 피딩속도를 변화시킨 조건으로 육성한 육성부의 표면 형상과 단면 마크로 조직을 Fig. 1에 나타내었다. 대부분의 조건 모두 비교적 양호한 비드 형상을 보였고 모재와의 코팅 상태도 양호한 것으로 보이지만 육성층의 양쪽 끝단부에 언더컷이 존재함을 알 수 있다. 또한 육성층의 두께와 폭이 조건별로 약간씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

육성 변수에 따른 육성층의 두께와 폭의 변화를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 회전속도와 이동속도를 증가시키면 육성층의 폭과 두께는 감소하였고 피딩속도를 증가시키면 육성층의 폭과 두께는 증가하였다. 따라서, 결과에서 보는바와 같이 본 실험의 조건 중에서는 1000rpm-2.5mm/s-2.5mm/s에서 가장 높은 육성 효율을 나타내었다. 즉, 동일한 크기의 육성봉을 사용하여 실험했을 때, 코팅층의 두께가 가장 두껍고 폭이 가장 넓은 것은 소성층이 코팅 공정간에 육성봉으로 엮혀져 있는 양이 적고 그만큼 더 모재로 적층이 많이 되어 진다는 것이다.

Table 2 Mechanical properties of S45C substrate and STS304 consumable rod

| | Mechanical Properties | | | |
|--------|--------------------------------------|--|-----------------------|---------------|
| | Yield strength (kg/mm ²) | Tensile strength (kg/mm ²) | Elongation (% in 5cm) | Hardness (Hv) |
| S45C | 28 | 55 | 46 | 190~210 |
| STS304 | 30 | 59 | 55 | 205~230 |

Table 1 Chemical composition of S45C substrate and STS304 consumable rod. (wt%)

| | Chemical composition (wt%) | | | | | | | | |
|---------|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Fe |
| S45C | 0.45 | 0.3 | 0.75 | 0.03 | 0.035 | - | - | - | Bal. |
| STS 304 | 0.066 | 0.58 | 0.82 | 0.029 | 0.002 | 18.29 | 8.79 | 0.14 | Bal. |

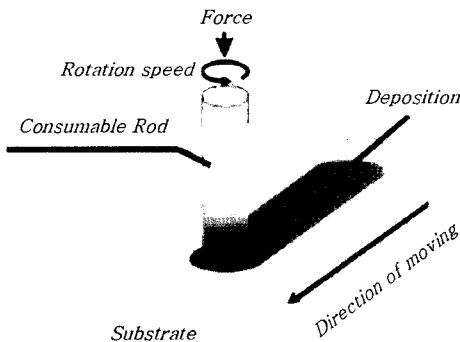


Fig. 1 Schematic diagram of friction surfacing process

Table 3 Friction surfacing parameters

| Rotation speed (rev/min) | Traveling speed (mm/s) | Feeding speed (mm/s) |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| 1000 | 2.5 | 2.5 |
| 1500 | 3.5 | 2.0 |
| 2000 | 4.5 | 1.0 |

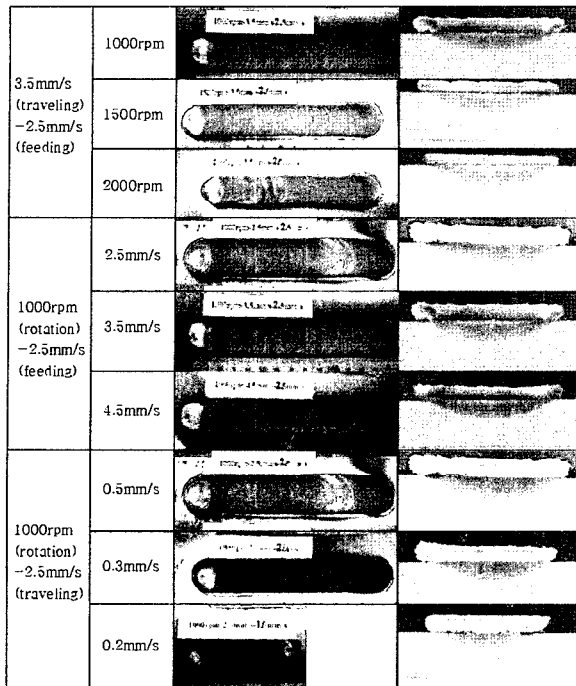


Fig. 1 Front surface and macrostructure of cross-section of friction surfacing layer

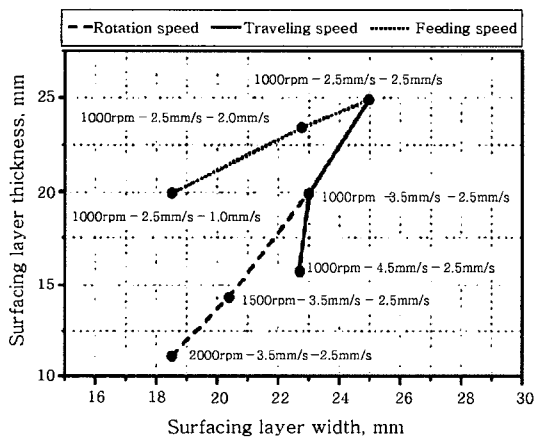


Fig. 2 Variation of thickness and width of surfacing layer with friction surfacing parameters.

Fig. 3은 1000rpm의 회전속도, 2.5mm/sec의 이동속도, 2.5mm/sec의 피딩속도 조건으로 육성한 육성층과 모재 조직을 나타낸 것이다. A~D STS 304 육성층의 조직으로 표면층(A,B)과 코팅 경계층(D)는 마찰 교반 접합시 TMAZ에 해당되는 조직으로써 기계적 영향으로 인해 연신된 조직을 보이고 있다. 중간층(C)은 SZ 영역에 해당되는 영역으로써 동적재결정으로 인해 재결정 조직이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. E~F는 S45C 모재 조직으로 E는 조대결정립 영역(CGHAZ), F는 미세 결정립 영역(FGHAZ), G는 부분 변태 영역(SC+ICHAZ), H는 BM의 조직을 보여

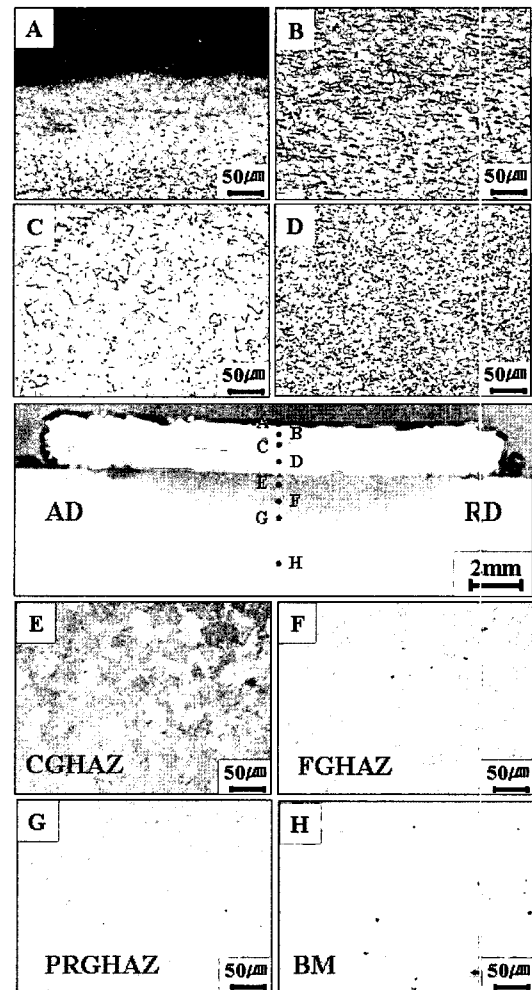


Fig. 3 Microstructure of friction surfacing layer and substrate. (1000rpm-2.5mm/sec-2.5mm/sec)

주고 있다. 또한 접합 계면(E)은 기공이나 결함이 없는 깨끗한 계면을 형성하고 있지만 육성층의 가장자리 부분에 언더컷 결함이 발생된 것을 확인할 수 있다. 언더컷의 발생은 공정의 특성상 발생될 수밖에 없지만 최적 조건에서 그 크기를 줄일 수 있다. 또한, 이러한 언더컷은 실제 제품에 적용될 때에는 후가공으로 제거해야 하는 공정이 필요하다.

Fig. 4는 각각의 조건으로 육성한 육성부의 증방향 경도 분포를 나타낸 것이다. 동일한 1000 rpm을 가지는 조건들은 모두 비슷한 경도분포를 나타내고 있다. 그러나 회전속도가 1000, 1500, 2000rpm으로 증가할수록 접합 계면의 경도가 급격히 증가하였다. 이는 회전속도가 증가할수록 소성층의 외부면이 모재와 직접적으로 발생하는 높은 마찰로 인해 FSW의 TMAZ와 같이 매우 큰 가공경화가 발생함과 동시에 접합계면의 야금학적 변화에 의해 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 육성층 접합계면의 특성 분석을 위해 EPMA와 EDS 분석을 한 결과이다. 분석 결과, 모든

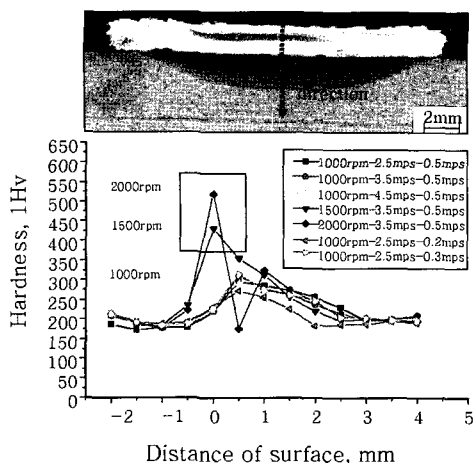


Fig. 4 Hardness profiles in cross section of friction surfacing layer

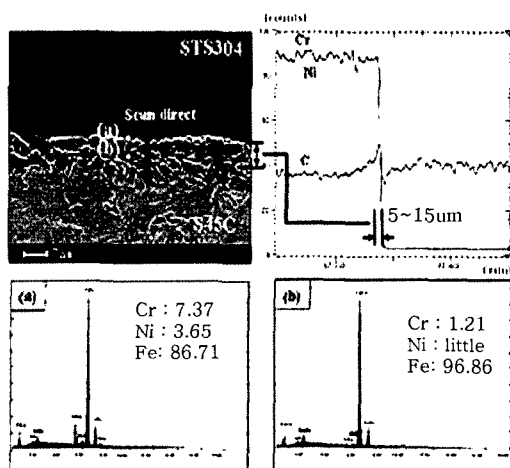


Fig. 5 EPMA and EDS analysis of interface layer. (1000rpm-2.5mm/sec-2.5mm/sec)

조건의 접합계면에서 5~15 μ m 정도의 새로운 층이 형성되어있는 것을 확인할 수 있었고, (a)와 (b)에서 나타내듯이 새로운 층은 Fe-Cr-Ni 합금층으로 판별되었다. 또한 SEM 관찰 결과, 전 조건에서 Fe-Cr-Ni 합금층에는 1 μ m 이하의 매우 미세한 기공이 형성되어 있었는데, 이는 마찰시 대기중의 산소와 S45C 모재내의 탄소가 결합하여 CO₂ 가스가 발생되었기 때문으로 생각된다³⁾.

마찰 육성 조건에 따른 Fe-Cr-Ni 합금층의 두께를 Table 4에 나타내었다. 육성봉의 회전속도와 피딩속도가 증가할수록 합금층의 두께는 증가하였고 이동속도는 감소할수록 합금층의 두께는 증가하였다. 이는 인해 마찰 입열량에 따라 합금층의 두께가 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한, 회전속도가 증가할수록 접합 계면에서의 Fe-Cr-Ni 합금층의 깊이가 증가하기 때문에 경도가 증가하는 것으로 사료된다.

S45C 모재, STS304 육성봉, 마찰 육성층의 내식

Table 4 Fe-Cr-Ni alloy layer depth with friction surfacing conditions

| Friction surfacing conditions | Alloy layer depth (μ m) |
|-------------------------------|------------------------------|
| 1000rpm-3.5mm/s-2.5mm/s | 7.1 |
| 1500rpm-3.5mm/s-2.5mm/s | 8.4 |
| 2000rpm-3.5mm/s-2.5mm/s | 12.9 |
| 1000rpm-2.5mm/s-2.5mm/s | 11.3 |
| 1000rpm-3.5mm/s-2.5mm/s | 8.2 |
| 1000rpm-4.5mm/s-2.5mm/s | 6.3 |
| 1000rpm-2.5mm/s-1.0mm/s | 6.7 |
| 1000rpm-2.5mm/s-2.0mm/s | 9.1 |
| 1000rpm-2.5mm/s-2.5mm/s | 11.3 |

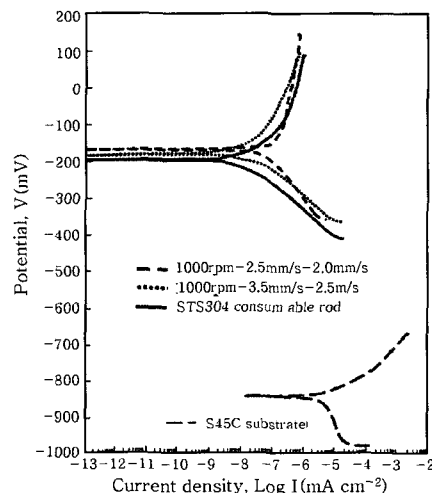


Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves for surfacing layer in 3.5% NaCl solution.

성을 확인하기 위하여 분극 저항 거동을 Fig. 6에 나타내었다. S45C는 매우 높은 전류 밀도를 나타내었으며 STS304 육성봉과 여러 조건의 마찰 육성층은 동일한 전류 밀도를 가지는 것을 보였다. 이로 인해 육성전의 재료의 내식 특성이 육성후에도 어떠한 변화 없이 동일하게 작용한다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

- 1) 육성봉 회전속도(1000rpm), 이동속도(2.5mm/s), 피딩속도(2.5mm/s)의 조건에서 가장 높은 효율을 가지는 육성층을 얻었다.
- 2) 회전속도의 증가에 따라 접합계면의 경도값은 상승하였다.
- 3) 접합계면에서 5~15 μ m 정도의 새로운 Fe-Cr-Ni 합금층이 존재하였다. 또한, 접합계면의 합금층에 1 μ m

이하의 기공이 발생되었다.

4) 마찰 육성 후에 육성층의 내식성은 변하지 않고 육성봉의 내식성과 동일하였다. 즉, 마찰육성으로 인해 재료 고유 특성의 변화는 발생하지 않았다.

참 고 문 헌

1. T. Shinoda, S. Okamoto, S.Takemoto, Y.kato, T.Shimizu :
Depositon of hard surfacing layer by friction surfacing ,
Welding International, **10-4**(1996), 288-294
2. K. FUKAKUSA : On the characteristics of the rotational
contact plane-A fundamental study of friction surfacing,
Welding International, 1996, **10**(7), 524-529
3. A.W.Batchelor, S.Jana, C.P.Koh, C.S.Tan : The
effect of metal type and multi-layering on friction
surfacing, Journal of Materials Processing Technology,
57(1996), 172-181