

후처리 적용에 따른 방식용 Al-3%Mg 용사코팅 층의 해수 내 전기화학적 특성

박 일 초*, 김 성 종^o

Electrochemical Characteristics in Sea Water of Al-3%Mg Arc Spray Coating Layer for Corrosion Protection with Sealing Treatment

Il-Cho Park*, Seong-Jong Kim^o

요 약

해양환경 하에서 강재에 대한 방식 목적으로 Al-3%Mg 용사신재를 이용하여 아크 용사코팅을 실시하였다. 그리고 Al-3%Mg 용사코팅 층의 내식성을 개선하기 위하여 유/무기 복합 세라믹 후처리를 실시하였다. 후처리 적용에 따른 용사코팅 층의 다양한 전기화학적 실험 결과, 양극분극과 음극분극 실험 시 모든 전위구간에서 후처리 적용 시 전류밀도가 작게 나타나 내식성 개선이 확인되었다. 그리고 후처리된 용사코팅 층의 표면에서 관찰된 마이크로 크랙의 영향으로 자연전위 계측 시 심한 전위변동이 나타났으며, 양극분극 실험 시에는 후처리 층의 탈리손상이 용이하게 발생하였다. 그럼에도 불구하고 타펠분석을 기반으로 외부 환경차단 효과를 나타내는 코팅 효율이 92.11%로 산출되어 Al-3%Mg 용사코팅 층의 내식성이 향상되었다.

Key Words : Arc Thermal Spray coating, Al-3%Mg, Post-sealing, Corrosion

ABSTRACT

Arc thermal spray coating using Al-3%Mg thermal spray wire was carried out to prevent steel from corrosion damage under the marine environment. Post-sealing was applied to Al-3%Mg spray coating treatment using organic/inorganic composite ceramics in order to improve the corrosion resistance of the as-sprayed coating. The results of various electrochemical experiments with sealing treatment indicated that the improvement in corrosion resistance was observed due to low current density in all applied potential range during anodic and cathodic polarization experiments. Furthermore, the natural potential measurement exhibited severe potential fluctuation due to influence of micro-crack presence on the surface of sealed thermal spray coating layer. In addition, the sealed layer was easily eliminated during anodic polarization. Nevertheless, Al-3%Mg spray coating layer improved corrosion resistance by sealing treatment because the sealed coating efficiency was determined to be 92.11%, indicating the exterior environment barrier effect which is based on the Tafel analysis.

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT융합고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음.(IITP-2015-H8601-15-1006)

※ 본 연구는 한국산업단지공단 '9차년도 산업집적지경쟁력강화사업' 지원으로 수행된 연구결과임.

• First Author : Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, pic@mmu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, ksj@mmu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2015-04-091, Received April 2, 2015; Revised May 19, 2015; Accepted May 19, 2015

I. 서 론

해양환경 하에서 강재(steel)에 대한 방식 목적으로 여러 표면처리 기술이 적용되고 있으며, 그 중 도장방식 코팅 기술이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 도장방식 코팅의 경우 자체 내구성이 열악하여 기계적 손상에 취약하고, 그에 따라 방식효과가 상실되어 그 수명이 불과 약 2-5년으로 짧다. 반면, 금속용사코팅 층의 경우 도장 대비 상대적으로 우수한 내구성과 방식을 위한 환경차단 효과 및 음극방식 효과를 병행하고 있어 그 수명이 약 10-25년으로 현저히 길다. 그로 인해 금속용사코팅 기술은 교량, 선박, 해양 플랜트 등 장기 수명이 요구되는 대형 구조물에 유용하게 적용되고 있다^[4]. 그러나 금속용사코팅 기술 적용 시 용사공정 특성 상 용사코팅 층 내부에는 다수의 열린 기공, 닫힌 기공 그리고 수직 균열과 같은 미세 구조 결함이 발생된다. 이렇게 용사코팅 층 내부에 형성된 미세 구조 결함은 해수가 모재까지 침투할 수 있는 통로 역할을 하게 되어 용사코팅 층의 내식성뿐만 아니라 내구성에도 부정적인 영향을 미치게 된다. 특히, 본 연구에서 사용된 아크용사 코팅 기술은 타 용사기법에 비해 용사코팅 적층구조가 치밀하지 못하여 Zn 또는 Al 아크용사 코팅 시 기공률이 일반적으로 약 5-10% 가량 발생한다^[5]. 이러한 용사코팅 층 내의 미세 구조 결함을 개선하기 위한 방법으로 용사재료의 완전 용융화를 위한 용사 조건 개선, 용사재료 용융과정 시 내부 반응물 생성 방지를 위한 진공 또는 불활성 기체 분위기 하에서의 용사, 용사코팅 실시 후 코팅 층에 존재하는 기공 및 균열을 외부 환경으로부터 차단하기 위한 후처리 등이 지속적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 그 일환으로 Al-3Mg 아크용사 코팅 층에 대하여 후처리(sealing) 작업을 통해 용사코팅 층 내에 존재하는 미세 구조 결함을 차단하여 방식 효과를 얻고자 하였다. 그리하여 강재에 아크용사 기법 적용 시 용사코팅 적층 두께를 감소시키고, 아크용사 코팅 작업 시 비용과 시간을 절감하여 용사코팅 생산성을 향상시키고자 하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 일반 구조용 강으로 널리 사용되고 있는 SS400을 모재로 사용하였으며, 그릿트 블라스트(grit blast)를 통해 조면을 형성시켰다. 그리고 Al-3Mg 용사전재를 이용하여 아크 용사를 실시하였다. 용사작업 시 용사건(spray gun)의 일정한 분사조

건을 유지하기 위하여 로봇제어시스템을 이용하였다. 용사조건은 공기압력 6.5-7 kg/cm², 출력전압 약 30 V, 출력전류 약 150 A 그리고 용사거리는 약 200 mm로 유지하여 용사도막 두께 200-250 μm로 시공하였다. 용사코팅 후에는 유/무기 복합 세라믹(organic & inorganic composite ceramic)을 브러쉬(brush)를 이용하여 용사코팅 층 표면에 도포하였으며, 가열 건조기에서 60 °C로 4시간 동안 건조하였다. 이러한 후처리 적용 유무에 따른 용사코팅 시험편에 대하여 천연해수 환경 하에서 동일한 조건으로 전기화학적 실험을 실시하였다. 모든 전기화학적 실험은 직접 제작한 시험편 홀더(holder)를 사용하여 0.332 cm²의 유효면적만을 노출시켜 실시하였으며, 기준전극은 Ag/AgCl 전극을, 대극은 백금전극을 사용하였다. 자연전위 측정실험은 18,000초 동안 실시하였으며, 분극실험 시 초기 안정화 시간은 3,600초로 하였다. 양극분극과 음극분극 실험은 개로전위에서 각각 +4.0 V 와 -3.0 V까지 2 mV/sec의 주사속도로 실시하였으며, 양극분극 실험 후에는 주사전자현미경과 3D 현미경을 이용하여 표면 손상부 형상 및 손상깊이를 관찰하였다. 또한 개로전위를 기준으로 하여 -0.25 V에서 +0.25 V까지 분극 시킨 후 타펠외삽법으로 부식전류 밀도 및 부식전위를 구하여 상호 비교하였다.

III. 실험결과 및 고찰

그림 1은 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 유/무기 복합 세라믹 후처리(이하 hybrid sealing) 적용 후 주사전자현미경으로 표면 형상을 관찰한 것이다. hybrid sealing이 적용된 시험편 표면에서는 표면 전반에 걸쳐 마이크로 크랙(micro crack)이 관찰된다. 미세 마이크로 크랙의 발생원인은 hybrid sealing 경화 시 휘발성 물질의 발생 및 증발이나 부피 수축에 따른 결과로 여겨진다^[6,7]. 이러한 마이크로 크랙은 내식성뿐만 아니라 hybrid sealing 자체의 내구성 저하 요인으로 작용하므로 양호한 후처리 코팅을 위해서는 건조공정에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 hybrid sealing 코팅 층 표면에서는 실링제(sealant) 도포 시 표면 돌출부에서는 실링제가 상대적으로 낮은 곳으로 흘러 내려가 얇게 코팅될 것으로 여겨진다.

그림 2는 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 hybrid sealing 적용 유무에 따른 해수 내 자연전위 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 먼저 hybrid sealing을 적용하지 않은 Al-3Mg 용사코팅 층의 자연전위 변화를 살펴보면 실험초기부터 약 -800 mV의 비교적 안정적인

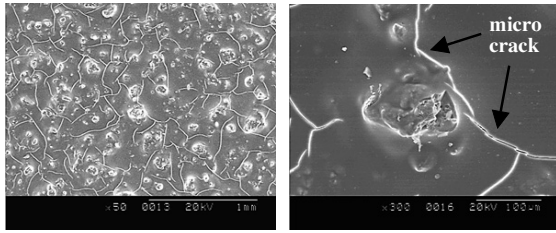


그림 1. 유/무기 복합 세라믹 후처리 적용된 Al-3Mg 용사코팅 층의 표면 형상
 Fig. 1. Surface morphologies of Al-3Mg thermal spray coating with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

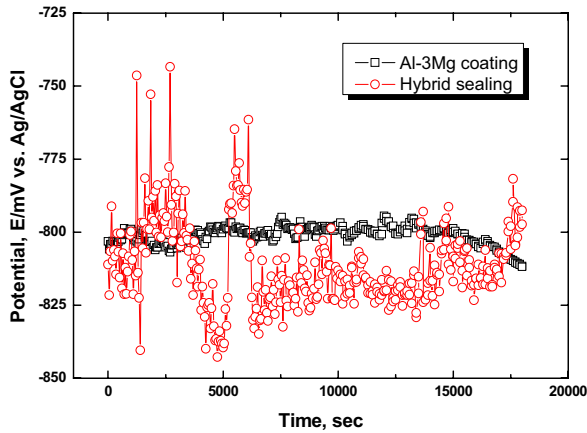


그림 2. 유/무기 복합 세라믹 후처리 적용에 따른 Al-3Mg 용사코팅 층의 해수 내 자연전위 측정
 Fig. 2. Potential measurement in sea water of Al-3Mg thermal spray coating with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

전위를 유지하였다. 그리고 침지시간 약 15,000초 경과 후 전위가 약간 비방향으로 이행하는 경향을 나타냈으며, 그로인해 실험종료 시점에는 약 -810 mV의 전위가 계측되었다. 이와 같이 Al-3Mg 용사코팅 층의 전위가 비방향으로 이행하는 것은 대기 중에서 용사코팅 층 표면에 형성된 부동태 피막이 해수에 포함된 Cl⁻ 이온에 의해 파괴되어 상대적으로 활성화전위를 나타내는 Al-3Mg 용사코팅 층이 해수에 노출되었기 때문으로 사료된다. 반면 hybrid sealing 적용된 Al-3Mg 용사코팅 층의 경우에는 실험초기부터 실험종료 시점까지 침지시간 경과에 따라 상대적으로 큰 폭의 불안정한 전위변동이 관찰되었다. 이는 hybrid sealing 적용 시 Al-3Mg 용사코팅 층 표면을 해수로부터 완벽하게 차단하지 못했기 때문으로 판단된다. 즉, hybrid sealing을 적용하지 않았을 경우에는 Al-3Mg 용사코팅 층이 해수에 전면적이 노출되어 비교적 빠르게 용사코팅 층 자체의 안정적인 전위를 나타낸 것으로 사료된다. 그러나 그림 1에서와 같이 hybrid sealing 적

용 시에는 코팅 층 표면의 수많은 마이크로 크랙 결함을 통해 해수가 매우 작은 용사코팅 층 표면적과 접촉하고, 동시에 해수 중 Cl⁻ 이온에 의해 Al₂O₃나 Al₂O₃·3H₂O와 같은 부동태 피막의 생성과 파괴가 발생하여 전위변동 폭이 크게 나타난 것으로 사료된다^[8]. 또한, 일반적으로 후처리 적용 시 용사코팅 층의 표면 기공(open pore)을 외부환경으로부터 차단하는 효과를 나타내어 후처리 적용 전보다 귀한 전위 값을 형성한다^[9-11]. 그러나 본 연구에서는 hybrid sealing 적용 전후 전위를 비교해보면 hybrid sealing 적용 시 오히려 전위가 낮거나 유사하게 나타났다. 이 역시 용사코팅 층 표면에 형성된 마이크로 크랙에 기인한 것으로 여겨지며, 국부적으로 해수에 노출된 용사코팅 층 부분이 표면 전반에 분포하여 hybrid sealing 적용 전과 유사한 전위 값을 형성하는 것으로 사료된다.

그림 3은 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 hybrid sealing 적용 유무에 따른 양극분극 경향을 나타낸 것이다. 전반적으로 전위 증가에 따라 전류밀도가 상승하는 경향을 나타냈다. 먼저 Al-3Mg 용사코팅 층을 살펴보면 부동태 특성이 나타나지 않은 활성화분극 거동을 나타냈다. 일부 알루미늄합금의 경우 해수 환경 하에서 Al₂O₃나 Al₂O₃·3H₂O와 같은 피막을 표면에 형성하여 전류밀도가 부분적으로 감소하는 부동태 특성을 나타내는 경우가 있다. 그러나 본 연구에서는 용사코팅 특성 상 시공 시 포함된 대기 불순물, 부분적으로 형성되는 산화물, 거친 표면상태 등 공정요인에 따른 불안정한 피막형성 및 분극실험 전 초기 안정화시간 동안 Cl⁻ 이온의 피막 파괴가 복합적으로 발생하여 부동태 구간이 형성되지 않은 것으로 사료된다.

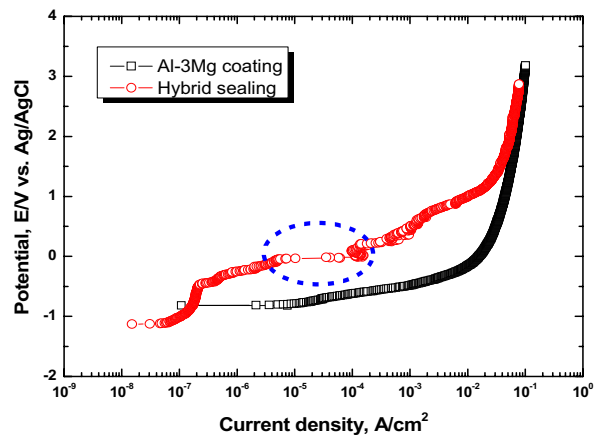


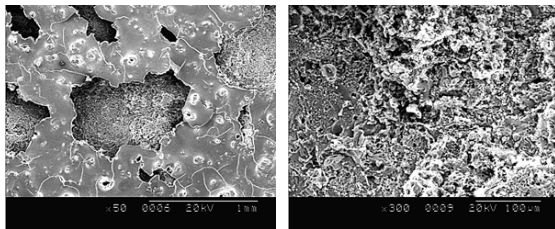
그림 3. 유/무기 복합 세라믹 후처리 적용에 따른 Al-3Mg 용사코팅 층의 해수 내 양극분극 곡선
 Fig. 3. Anodic polarization curve in sea water of Al-3Mg thermal spray coating with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

반면 hybrid sealing 적용 시에는 개로전위(open circuit potential) -1.13 V로부터 -0.48 V까지의 전위 구간에서 전류밀도 증가가 일시적으로 정체되는 구간이 발생하였으며, 이후 전위구간에서는 전위 증가에 따라 전류밀도가 크게 증가하였다. 특히 표시된 부분(점선 타원)과 같이 약 0 V 전위 부근에서 급격한 전류밀도 상승이 관찰되었는데 이는 hybrid sealing 적용된 용사코팅 층이 활성 용해반응으로 hybrid sealing 코팅 층 일부가 탈리되면서 순간적으로 용해반응에 참여하는 Al-3Mg 용사코팅 층의 노출 면적이 증가하여 나타난 현상으로 사료된다. 그러나 결과적으로 Al-3Mg 용사코팅 층에 hybrid sealing 적용 시 마이크로 크랙에 의한 결함이 발생하였으나 전체적으로 hybrid sealing 적용 전과 비교하여 전위 증가에 따른 전류밀도가 작게 나타나 내식성 개선효과가 확인되었다.

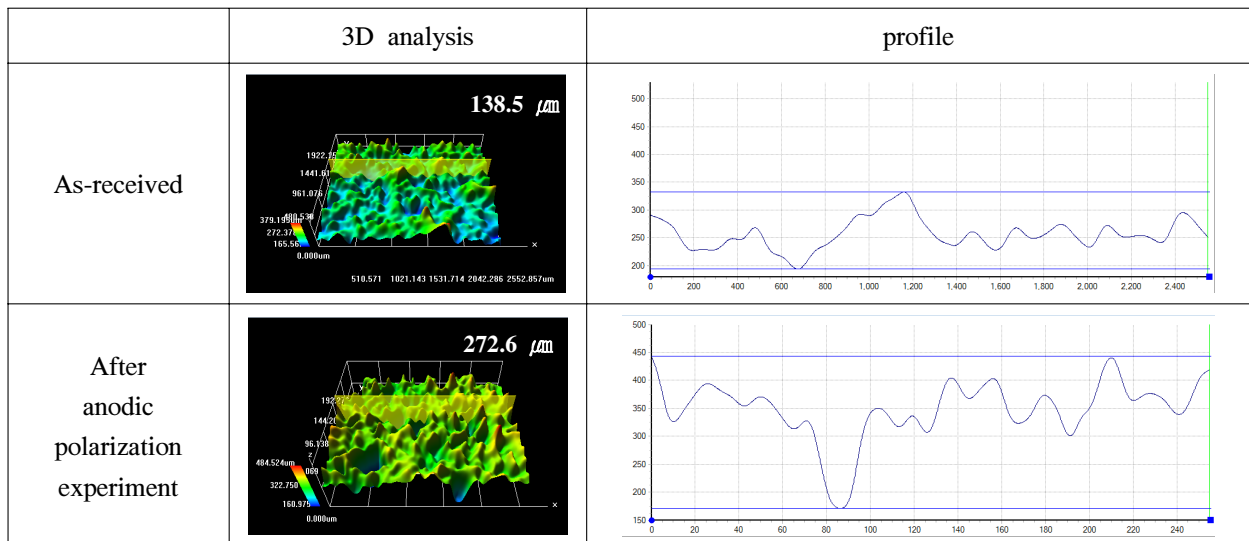
그림 4는 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 hybrid sealing 적용 유무에 따른 양극분극실험 후 표면손상 형상을 주사전자현미경과 3D 현미경을 통해 관찰한 것이다. 먼저 그림 4(a)에서 주사전자현미경을 통한

표면 관찰 결과, 양극분극실험 후 표면손상 형상을 살펴보면 x50 배율 사진에서는 활성 용해반응 시 마이크로 크랙의 영향으로 비교적 손쉽게 hybrid sealing 코팅 층의 탈리 손상이 발생한 것으로 여겨지며, 그로 인해 노출된 Al-3Mg 용사코팅 층의 용해반응에 따른 손상부가 관찰되었다. x300배율 사진에서 노출된 Al-3Mg 용사코팅 층의 손상 표면을 살펴보면 공극과 같은 깊이방향 손상 경향이 아닌 희생양극 재료로서 양호한 특성인 넓이방향의 균일한 표면손상 경향을 나타냈다. 그러나 활성 용해반응이 진행됨에 따라 넓이방향의 손상부가 hybrid sealing 코팅 층 하부까지 진행되어 들뜬 형상을 나타냈으며, 그로 인해 hybrid sealing 코팅 층의 내구성 저하와 탈리 손상이 더욱 촉진된 것으로 여겨진다. 다음으로 그림 4(b)에서 3D 분석을 통한 표면 손상을 살펴보면, hybrid sealing 적용 시 실링재가 용사코팅 층 표면 결함부위를 매우게 되므로 표면 손상깊이는 138.5 μm로 작게 측정되었다. 반면 hybrid sealing 적용된 용사코팅 층의 양극분극 실험 후에는 hybrid sealing이 부분적으로 탈리되고 그 손상부위 내부에서 활성 용해반응이 발생하여 표면 손상깊이는 272.6 μm로 측정되었으며, 실험 전과 비교하여 약 2배 정도 크게 나타났다.

그림 5는 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 hybrid sealing 적용 유무에 따른 음극분극 경향을 나타낸 것이다. 일반적으로 해수용액 속에 침전된 금속의 경우 음극분극 초기에는 용존산소 환원반응($O_2 + 2H_2O +$



(a) SEM analysis



(b) 3D analysis

그림 4. 유/무기 복합 세라믹 후처리 적용에 따라 해수 내 양극분극 실험 후 Al-3Mg 용사코팅 층의 표면 형상
 Fig. 4. Surface morphologies of Al-3Mg thermal spray coating after anodic polarization experiment in sea water with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

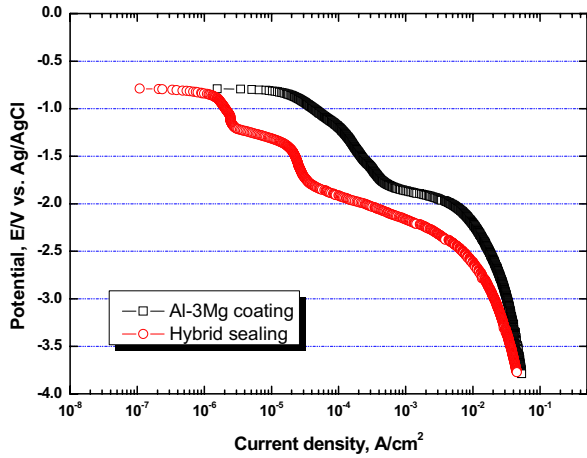
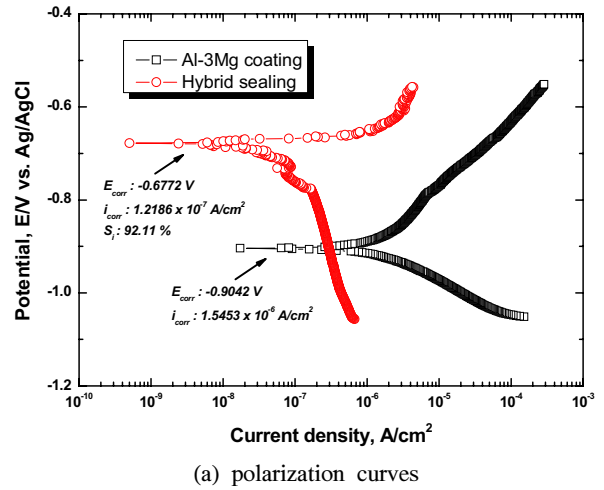


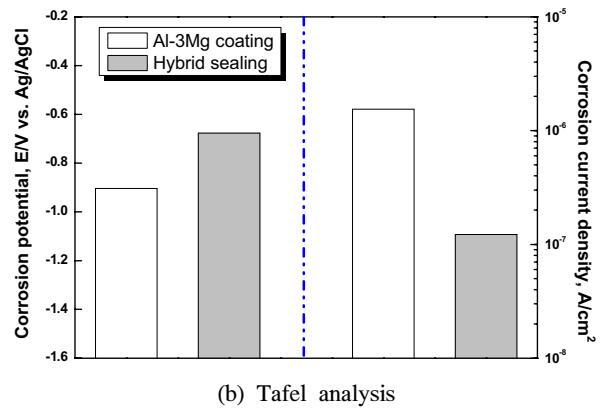
그림 5. 유기/무기 복합 세라믹 후처리 적용에 따른 해수 내 Al-3Mg 용사코팅 층의 음극분극 곡선
 Fig. 5. Cathodic polarization curves in sea water of Al-3Mg thermal spray coating with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

4e⁻ → 4OH⁻)에 의한 농도분극이 관찰되고, 이후 수소 가스 발생에 의한 활성화분극(2H₂O + 2e⁻ → H₂ + 2OH⁻)을 나타내어 두 반응이 명확하게 구분된다^[11-13]. 본 연구에서는 Al-3Mg 용사코팅 층의 경우 농도분극과 활성화 분극이 관찰되어 일반적인 음극분극 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 hybrid sealing 적용 시험편의 경우에는 개로전위로부터 약 -1.8 V까지 2단계에 걸친 농도분극과 활성화분극 구간이 관찰되었으며, Al-3Mg 용사코팅 층에 비해 상대적으로 작은 전류밀도를 나타내어 다소 다른 경향을 보였다. 이는 hybrid sealing 적용 시험편 표면에 형성된 마이크로 크랙의 영향에 기인한 것으로 용존산소 환원반응과 수소가스 발생 반응이 마이크로 크랙과 같은 미세 국부영역에서만 제한적으로 발생하게 되므로 전기화학적 반응을 방해하여 나타난 결과로 사료된다. 이후 전위구간에서는 활성화분극에 의한 전류밀도 증가 경향이 유사하게 관찰되었다. 그러나 모든 전위구간에서 동일 전위에 대한 해당 전류밀도 비교 시 상대적으로 hybrid sealing이 적용된 용사코팅 층이 작은 값을 나타냈다. 결과적으로 양극분극과 음극분극 실험에서 모두 hybrid sealing 코팅 적용 시 전위변화에 따른 모든 전류밀도 값이 작게 측정되어 해수환경 하에서 내식성이 향상되었음을 알 수 있다.

그림 6은 Al-3Mg 용사코팅 층에 대하여 hybrid sealing 적용 유무에 따른 분극실험 후 타펠분석(Tafel analysis)을 통해 부식전위와 부식전류밀도를 나타내었다. hybrid sealing 적용 시 Al-3Mg 용사코팅 층에 비해 귀한 부식전위 및 낮은 부식전류밀도가 측정되



(a) polarization curves



(b) Tafel analysis

그림 6. 유기/무기 복합 세라믹 후처리 적용dp 따른 Al-3Mg 용사코팅 층의 해수 내 타펠분석 결과
 Fig. 6. Results of Tafel analysis in sea water of Al-3Mg thermal spray coating with sealing treatment of organic & inorganic composite ceramic

어 내식성이 확연히 개선되었음을 알 수 있다. 그리고 다음 (1)을 적용하면 전기화학적 실험을 통해 hybrid sealing 코팅의 기공율을 정량화할 수 있다^[9,10,14].

$$P = \frac{i_c}{i_s} \times 100\% \quad (1)$$

여기에서 P는 hybrid sealing 코팅의 기공율(open pore), i_c는 hybrid sealing 코팅의 부식전류 밀도, i_s는 Al-3Mg 용사코팅 층의 부식전류밀도이다. 또한 전기화학적 방법을 통해 코팅 층의 기공율 뿐만 아니라 아래의 (2)를 적용하여 후처리 코팅 효율 S_i(%)를 구할 수도 있다^[10,15,16].

$$S_i(\%) = \left[1 - \left(\frac{i_a}{i_b} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

여기에서 i_a 는 hybrid sealing 적용 시 부식전류밀도이고, i_b 는 후처리 적용 전 부식전류밀도이다. 상기 계산식을 통한 hybrid sealing 코팅 효율은 92.11 %로 계산되었으며, 이는 Al-3Mg 용사코팅 층에 존재하는 전체 기공(open pore) 중 92.11 %가 hybrid sealing 코팅에 의해 차단되었음을 의미한다. 따라서 hybrid sealing 적용 시 타펠분석을 통해 부식전류밀도가 작아지는 것을 확인하였고, 이는 Al-3Mg 용사코팅 층의 기공 감소에 기인하여 내식성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

해양환경 하에서 모재 SS400강을 방식하기 위해 Al-3Mg합금 용사재료를 이용하여 아크용사 코팅을 실시하였다. 그리고 Al-3Mg 용사코팅 층의 내식성을 향상시키기 위해 용사코팅 층에 hybrid sealing을 적용하고, 다양한 전기화학적 실험을 통해 hybrid sealing 적용 유무에 따른 내식성을 비교/분석하였다. 그 결과 양극분극과 음극분극 실험에서 Al-3Mg 용사코팅 층에 hybrid sealing 적용 시 모든 전위구간에서 Al-3Mg 용사코팅 층에 비해 작은 전류밀도가 나타났다. 또한 양극분극 실험 후 표면손상 관찰 결과, 활성 용해반응 시 hybrid sealing 코팅 층의 마이크로 크랙 결함 영향으로 탈리손상이 용이하게 발생하였다. 그리고 타펠분석에서는 hybrid sealing 코팅 효율이 92.11%를 나타내어 상당한 내식성 개선효과가 확인되었다.

References

[1] R. H. Unger, "Thermal Spraying of Bridges," *National Thermal Spray Conf.*, pp. 399-406, Florida, USA, 1987.

[2] K. J. Altorfer, *Atmospheric Corrosion*, John Wiley and Sons, (645-650), 1982.

[3] D. Grasmе, "Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik DVS-Verlag GmbH," *Thermal Spraying Conf.*, pp. 188-191, 1993.

[4] S. Kawahara and R. Sumida, "R. Nippon yosha kyokai shi," *J. TSS*, vol. 31, no. 1, pp. 37-42, 1994.

[5] S. J. Kim and S. J. Lee, "Effects of F-Si sealer on electrochemical characteristics of

15%Al-85%Zn alloy thermal spray coating," *Trans. Nonferrous Metal Soc. Ch.*, vol. 21, pp. 2798-2804, 2011.

[6] J. H. Baek, J. H. Lee, M. G. Lee, C. S. Suh, S. T. Kwak, and M. J. Moon, "Characterization of adhesion and preparation of functionalized organic-inorganic hybrid epoxy coatings," *J. Kor. Soc. Imag. Sci. Tech.*, vol. 12, no. 2, pp. 53-60, 2006.

[7] M. S. Han, S. J. Lee, S. K. Jang, and S. J. Kim, "Electrochemical and cavitation characteristics of Al thermal spray coating with F-Si sealing," *Corros. Sci. Tech.*, vol. 9, no. 6, pp. 317-324, 2010.

[8] S. J. Kim and S. K. Jang, "Mechanical and electrochemical characteristics in welding with robot on 6061-T6 Al alloy for Al ship," *J. KOSME*, vol. 33, no. 2, pp. 313-321, 2009.

[9] S. Liscano, L. Gil, and M. H. Staia, "Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings," *Surf. Coat. Tech.*, vol. 188-189, pp. 135-139, 2004.

[10] Z. Liu, D. Yan, Y. Dong, Y. Yang, Z. Chu, and Z. Zhang, "The effect of modified epoxy sealing on the electrochemical corrosion behaviour of reactive plasma-sprayed TiN coatings," *Corros. Sci.*, vol. 75, pp. 220-227, 2013.

[11] S. J. Kim, S. J. Lee, I. J. Kim, S. K. Kim, M. S. Han, and S. K. Jang, "Cavitation and electrochemical characteristics of thermal spray coating with sealing material," *Trans. Nonferrous Metal Soc. Ch.*, vol. 23, pp. 1002-1010, 2013.

[12] S. J. Kim and J. I. Kim, "Evaluating the electrochemical properties in the protection potential of material for use in Al vessels in seawater," *Mater. Sci. Forum*, vol. 510-511, pp. 158-161, 2006.

[13] S. J. Kim, S. K. Jang, and J. I. Kim, "Characteristics evaluation of thin films formed in Mg-Al alloy in various chemical conversion solution conditions," *J. KOSME*, vol. 29, no. 1, pp. 98-106, 2005.

[14] P. Siitonen, S. L. Chen, K. Niemi, and P.

Vuoristo, "Electrochemical method for evaluating the corrosion resistance and porosity of thermal sprayed coatings," *Int. Thermal Spray Conf.*, pp. 853-858, Orlando, USA, Jun. 1992.

- [15] Y. J. Yu, J. G. Kim, and S. H. Cho, "Plasma-polymerized toluene films for corrosion inhibition in microelectronic devices," *Surf. Coat. Tech.*, vol. 162, pp. 161-166, 2003.
- [16] Y. H. Yoo, D. P. Le, and J. G. Kim, "Corrosion behavior of TiN, TiAlN, TiAlSiN thin films deposited on tool steel in the 3.5 wt.% NaCl solution," *Thin Solid Films*, vol. 516, pp. 3544-3548, 2008.

김성종 (Seong-Jong Kim)



1991년 2월 : 한국해양대학교 기관공학과 졸업
 1997년 8월 : 한국해양대학교 부식방식공학과 석사 졸업
 2001년 2월 : 한국해양대학교 용접&열처리공학과 박사 졸업
 2005년 4월 : 일본 나고야대학 환경표면처리공학과 박사 졸업

2003년 9월~현재 : 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수
 <관심분야> 부식방식공학, 환경표면처리공학, 용접공학, 열처리공학

박일초 (Il-Cho Park)



2008년 2월 : 목포해양대학교 전제어공학과 졸업
 2015년 2월 : 목포해양대학교 응용역학·재료공학과 석사 졸업
 2015년 3월~현재 : 목포해양대학교 응용역학·재료공학과 박사과정

<관심분야> 부식방식공학, 표면처리공학