CORROSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol.13, No.5(2014), pp.195~203 pISSN: 1598-6462 / eISSN: 2288-6524
DOI: http://dx.doi.org/10.14773/cst.2014.13.5.195

다양한 금속 부품의 내식성 향상을 위한 Zn-Al 열 확산 코팅 기술 개발

이 주 영[1] · 이 주 형[2] · 황 준[2] · 이 용 규[1,†]
[1]한국교통대학교 화공생물공학과, [2]한국교통대학교 항공 • 기계설계학과
충북 충주시 대학로 50 한국교통대학교
(2014년 3월 31일 접수, 2014년 10월 24일 수정, 2014년 10월 27일 채택)

Development of Zn-Al thermal diffusion coating technology for improving anti-corrosion of various metal products

Joo-young Lee[1], Joo-hyung Lee[2], Joon Hwang[2], and Yong-kyu Lee[1,†]
[1]Department of Chemical and Biological Engineering, [2]Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungbuk 380-702, Republic of Korea.
(Received March 31, 2014; Revised October 24, 2014; Accepted October 27, 2014)

Modern industry has a wide variety of application areas such as ocean industry, construction and automobile industry. With the current circumstances, the need for anti-corrosion technology that can be used on materials to withstand in harsh environments, is increasing. In this study, we have sought to develop a metal coating technology with zinc and aluminum powders as a potential anti-corrosion material. To make a coating on metal products, a thermal diffusion coating method was used under the conditions of 350℃ for 30 minutes. Optical microscope, Field emission scanning electron microscope (FE-SEM&EDX) and X-ray diffraction analysis were used to analyze a coating layer. As a result, we have confirmed that the generated amount of rust on metal parts coated with thermal diffusion coating method decreased dramatically compared with non-coated metal parts. Furthermore, the anti-corrosion performance was evaluated according to the different ratio of zinc and aluminum. Finally, we confirmed the possibility of application and commercialization of our coating technique on metal parts used in harsh industrial based on the results of these performance.

Keywords : *anti-corrosion, metal products, Zinc-Aluminum, thermal diffusion coating*

1. 서 론

현대산업에서 금속제품 비중 및 적용분야가 확대되고 있으며, 다양한 환경조건에서 금속제품이 사용 가능하도록 발전하고 있다. 특히, 해양 산업 발전에 따라 해수의 높은 염분 같은 가혹한 부식 환경조건 에서 견딜 수 있는 제품개발의 필요성이 증대되고 있다.[1),2)] 또한, 자동차부품 수출에 있어서도 내식성이 뛰어난 제품을 외국에서 요구하고 있어 고부가가치의 금속제품 수요가 날로 증가하고 있는 추세이다.[3)] 현재 내식성 향상을 위한 기술개발로는 강판의 하층에 처리하는 크로메이트 방식을 사용하고 있으나, 크롬은 환경규제 물질로 분류되어 심각한 환경오염 및 사람에게 강한 독성을 유발하게 된다. 따라서 전 세계적으로 크롬을 사용하지 않는 연구가 활발히 진행되고 있는데,[4),5),6)] 대표적인 예로 무전해도금, 진공도금, CVD법, 열확산 코팅공정법 등이 있다.[7),8),9)] 또한, 그래핀 같은 신소재를 이용한 새로운 코팅소재개발 연구도 활발하게 진행되고 있다.[10)]

전기도금의 경우 진공장비를 이용하는 비해 낮은 비용으로 뛰어난 밀착성과 내식성이 우수한 피막을 얻을 수 있어 항공기, 컴퓨터 부품, 장신구 등에 사용되어지고 있지만 독성이 강한 물질과 폐수처리에 어려움이 발생되고 있다.[11),12),13),14)] 무전해도금 방식은 환원 반응을 이용하여 플라스틱 제품이나 금속 제품 일부에 도금을 하는 방식이지만 전처리 과정이 까다로운 단점이 있다. CVD법은 가스와 열, 플라즈마를 이용하여 피막을 형성시키는 방법으로 다양한 모재와 균일한 피막 형성이 가능하지만 부산물 처리비용이 많이 들어 경제적이지 못하는 단점이 있다. 열 확산 코팅 방법은 화학 기상 증착법과 열 확산 공정에서 수정된 방법이

† Corresponding author: leeyk@ut.ac.kr

Table 1. The ratios of Zn-Al thermal diffusion coating mixture powder

Zn-Al thermal diffusion coating	Zn powder (g)	Al powder (g)	Activator (g)	Temperature (℃)	Input Ar gas	Time (min)
Sample 1	8~12	0~2	1	350	Full time	30
Sample 2	6~10	0~4				
Sample 3	4~8	2~6				
Sample 4	2~6	4~8				
Sample 5	0~4	6~10				
Sample 6	0~2	8~12				

Table 2. The property of Fe substrate, zinc and aluminum powder

Fe substrate			Zinc powder			Aluminum powder		
Phase(Rt.)	Mp.	Bp.	Phase(Rt.)	Mp.	Bp.	Phase(Rt.)	Mp.	Bp.
Solid	1538℃	2862℃	Solid	419.53℃	907℃	Solid	660.32℃	2519℃

며, 코팅되는 모재를 폐쇄된 팩 내에 넣어 일정 시간 동안 고온의 상태로 유지하는 방법으로 진행이 된다.[15)]

대표적인 코팅소재 및 기술로는 아연도금방법을 이용한 2원계 및 3원계 합금 도금이 국내외적으로 이용되고 있다. 아연합금도금은 탄소강을 부식으로부터 보호하기 위한 가장 대표적인 방법이지만 사용되는 환경이 더욱 가혹해짐에 따라 보다 우수한 내식성이 요구된다. 특히, 아연의 취약한 산화 방지 특성을 해결하기 위해 새로운 아연기반의 알루미늄 합금 제품을 개발하고 있으며, 최근의 결과에서는 95% 아연-5%알루미늄과 45% 아연-55%알루미늄 형태의 용융도금이 우수한 내식성과 산화방지 효과를 보여 주고 있다.[16),17)]

본 연구에서는 아연과 알루미늄을 이용하여 열확산코팅 공정기술과 접목한 새로운 코팅기술을 개발하고 내식성 향상을 확인하고자 하였으며, 용융도금에서 요구되는 높은 온도와 복잡한 공정을 단순화하여 새로운 열확산코팅공정 기술도 개발하고자 하였다. 더 나아가 용융도금에 비해 짧은 열처리시간과 생산성 효율증가 여부를 확인하고자 하였으며, 기존 제품과의 비교를 통해 본 코팅물질의 우수한 내식성을 관찰하고자 하였다. 최종적으로, 염수분무 1200시간 이후에도 모재의 구조와 형태를 그대로 유지할 수 있는 결과를 바탕으로 모든 금속 제품에 적용 가능한 산업체 맞춤형 platform기술로 개발하고자 한다.

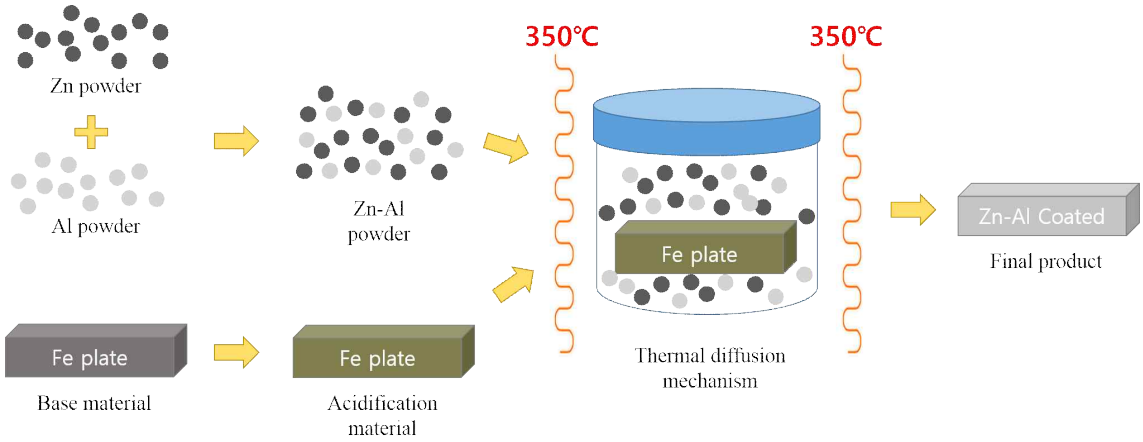
2. 연구방법

2.1 철 시료의 세척 과정

열 확산 코팅을 하기 위한 전처리 과정으로 철 시료의 표면에 존재하는 녹과 각종 이물질을 제거하는 단계이다, 방법으로는 철 시료를 10%의 황산 용액에 5~10분 동안 처리하여 효과적인 도금층 형성에 기여할 수 있도록 하며[11)], 추가적으로 증류수를 이용하여 초음파 세척을 5분간 처리한 후 자연 건조 시킨다.

2.2 Zn-Al 열 확산 코팅 과정

열 확산 코팅을 위한 혼합 분말 재료의 주성분은 아연(Zn), 알루미늄(Al), 활성제인 염화암모늄(NH_4Cl)으로 구성되었으며 혼합 비율은 Table 1에 나타내었다.[18),19),20)] 아연(Zn), 알루미늄(Al), 염화암모늄(NH_4Cl)을 비율별로 무게를 측정하여 균일하게 혼합한 후, 코팅하고자 하는 철 시편과 함께 알루미나 도가니에 투입한다. 그런 다음, 알루미나 도가니를 전기로에 넣은 후 불활성 기체인 아르곤(Ar)가스를 주입하고 350℃에서 90분간 가열한다. 열처리를 마친 후 약 50분간 자연 냉각 시키고 전기로에서 알루미나 도가니를 꺼낸다. 실온 상태인 알루미나 도가니에서 철 시편을 꺼낸 후 증류수로 세척하여 열 확산 코팅과정을 마무리한다. 본 연구에서 사용되는 주요 금속 Fe, Zn 그리고 Al의 녹는점 및 끓는점을 Table 2에 나타내었다.



Scheme 1. Zn-Al thermal diffusion coating process on carbon steel substrate

2.3 형태학적 관찰

주사전자현미경(FE-SEM, GELO, JSM-6700)을 이용하여 열 확산 코팅된 철 시료 표면의 형태를 관찰하였고, Energy Dispersive X-ray Spectrometer(EDX, JSM-7910F)를 이용하여 철 표면의 성분분석을 실시하였다. 분석조건으로 분석할 시료 표면에 백금 코팅 처리를 한 후 이미지 촬영을 하였으며, ×300와 ×500배율에서 표면을 관찰하였다.

2.4 광학현미경을 통한 코팅층 단면 분석

Zn-Al 열 확산 코팅된 철 시료의 코팅 단층을 촬영하기 위해 자연 경화되는 에폭시와 함께 틀에 부어 고정시키는 콜드 마운팅 기법을 이용하여 샘플을 제작하고, 틀에서 뺀 샘플은 코팅층의 단면을 보기위해 연마기를 이용하여 #400 -> #800 -> #1,200 -> #2,000 사포로 연마과정을 거친다. 미세연마를 통해 코팅 단면의 표면 스크래치를 없앤 후 광학 현미경(Nikon, MA100)을 통하여 영상을 촬영하였다.

2.5 X-선 회절 분석

철 시료 표면에 코팅된 합금 성분을 확인하기 위해 X-선 회절 분석기(Buruker, D8 Advance)를 이용하였다. 이를 통하여 Zn-Al 열 확산 코팅된 철 시료 표면의 합금 형성 유무와 조성을 분석하였다.

2.6 염수분무시험 분석

염수분무시험 분석(Vision Tech, VT-ST 100)은 KSD9502의 기준에 따라 5% NaCl 용액을 제조한 후 염수분무하여 금속의 내식성을 평가하였다. KSD9502에서 분무실 조건은 5% NaCl 용액을 35℃의 온도로 설정 한 후 분무하도록 설정하였다. 염수실험의 진행은 6시간 분무/18시간 중단의 조건으로 총1,000시간 이상 동안 염수분무시험을 진행하였다.

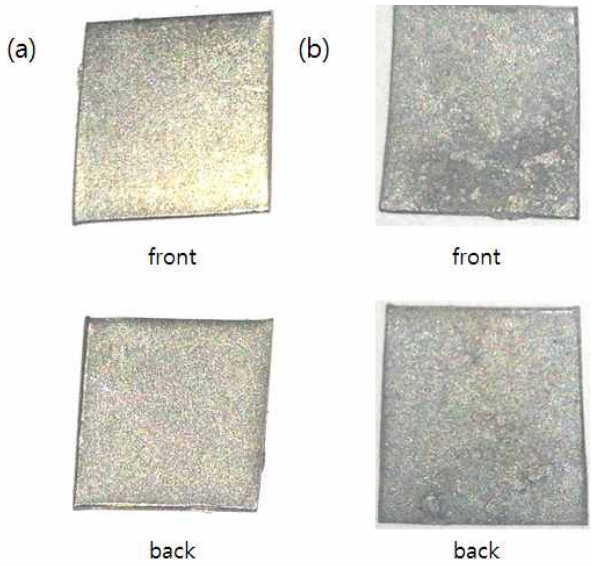


Fig. 1. Surface images of steel substrate before/after Zn-Al thermal diffusion coating. (a) carbon steel plate (front and back) before coating and (b) after coating with Zn-Al.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 철 시료의 Zn-Al 열 확산 코팅

3.1.1 코팅층 형태 및 성분 분석

Scheme 1은 전반적인 열 확산 코팅과정 모식도를 나타낸 것으로 알루미늄과 아연을 일정비율로 혼합하여 350℃에서 철 표면에 융해된 아연과 알루미늄이 철 표면 전체에 균질하게 코팅되도록 설계되었다. Fig. 1은 코팅 전 후의 철 표면색 변화와 최적의 비율에 따른 Zn-Al 코팅층 형성

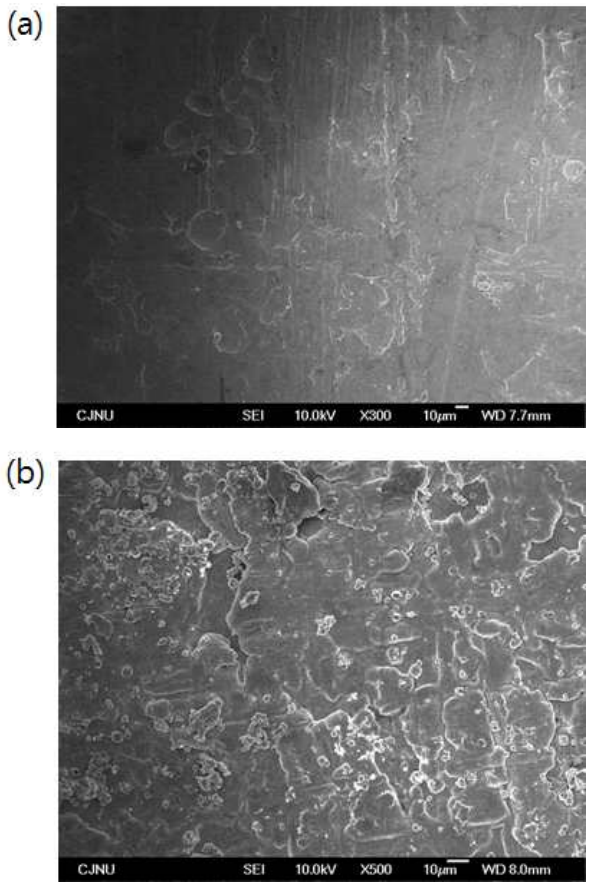


Fig. 2. The surface of steel substrate after/before coating observed by FE-SEM. (a) base material of carbon steel substrate (×300), (b) Zn-Al thermal diffusion coated carbon steel substrate (×500).

Table 3. Weight% of element on the substrate before/after Zn-Al thermal diffusion coating

Element	Before coating (weight %)	After coating (weight %)
Fe	93.14	33.53
Zn	-	53.16
Al	-	1.05
O	3.10	7.53
C	3.76	4.74
Total	100	

을 나타낸 것으로 전체 표면에 균질하게 코팅되었음을 확인하였다. 앞과 뒤 이미지 분석을 통하여 모두 코팅이 균일하게 되었고, 이는 열 확산 방식 코팅이 어떠한 형상에도 적용가능함을 보여주었다.

코팅여부를 확인하기 위해 FE-SEM와 EDX를 이용하여 Zn-Al 열 확산 코팅된 시료의 표면을 분석하였다. 열 확산

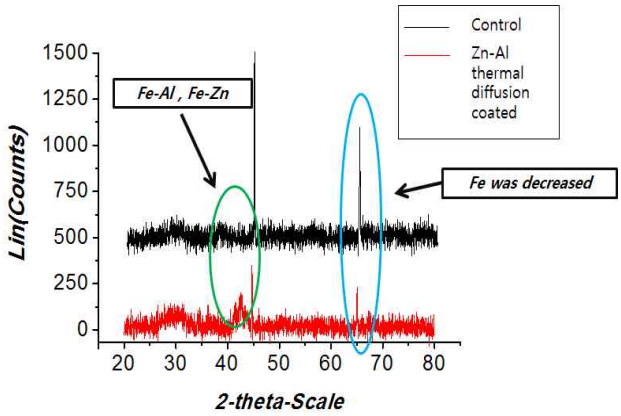


Fig. 3. X-ray diffraction data of Zn-Al thermal diffusion coated steel substrate.

코팅은 Table 1의 sample 2 비율로 코팅이 진행되었으며 코팅된 시료 표면의 이미지와 원소 성분은 Fig. 2와 Table 3에 비교하여 정리하였다. Fig. 2(a)에서 관찰한 사진은 열 확산 코팅 전 시료의 표면을 300배 배율로 확인하였으며, 열 확산 코팅 후 시료의 표면을 자세하게 관찰하기 위해 500배의 배율로 관찰하였다. 그 결과 주사전자현미경에서 열 확산 코팅 후 표면분석 결과 열 확산 코팅 전과는 다르게 코팅층이 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한, 원소 성분 분석 결과 열 확산 코팅 전 시료의 표면에서는 철(Fe)의 함량이 93.14%로 확인되었고, 탄소(C)와 산소(O)는 각각 3.76%, 3.10%로 확인되었다. 반면에, 열 확산 코팅 후 시료의 표면에서는 아연(Zn)의 함량이 53.16%로 높게 나왔고, Fe는 33.53%로 적게 나왔으며 염소(Cl)이 2.65%로 활성제의 원소가 검출된 것을 확인하였다. 또한, 탄소(C)와 산소(O)는 각각 4.74%, 7.53%로 확인되었다. 원소 성분 분석 결과를 바탕으로 철 시료 표면의 성분이 달라짐을 확인하였으며 Zn-Al 열 확산 코팅 후 철 표면에는 아연이 새롭게 검출되었으며 함량이 높고, 철의 함량이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 시료의 표면에 X-선을 조사하여 표면이 가지는 결정체 물질에 따른 회절 각도의 고유값을 나타내는 것이다. 시료 표면 위의 코팅층 합금 분석을 위하여 X-선 회절 분석 확인 결과, Zn-Al 열 확산 코팅된 시료의 표면에서 1개의 새로운 피크를 확인하였다.

또한, EDX에서의 결과와 동일하게 코팅 표면에서의 철성분이 감소됨을 확인하였으며, 그 외에 새로운 합금형태인 철과 아연(Zn)의 합금, 철(Fe)과 알루미늄(Al)의 합금 피크를 확인할 수 있었다.[21] 이로써 철과 코팅물질이 성공적으로 결합하였음을 확인하였다.

Fig. 4는 코팅 층의 두께를 측정하기 위해 시료의 단면을 광학현미경을 이용하여 확인하였다. 그 결과 탄소강 철판 표면 위에 형성 된 코팅 층의 두께는 각각 13.83, 12.7, 9㎛ 이었으며 전체적으로 약 12㎛의 코팅 층이 형성되었음

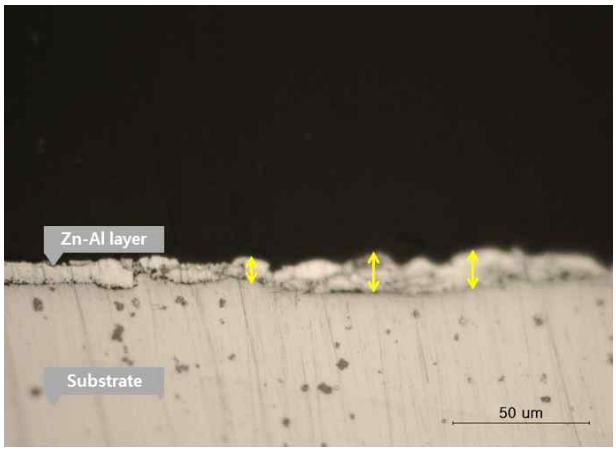


Fig. 4. Cross section of Zn-Al thermal diffusion coated carbon steel substrate. The layer's thickness is about 12㎛.

을 확인하였다. 이러한 최적화된 코팅공정은 비교적 강도 높은 균일한 코팅 층이 형성을 위해 최적화되었음을 확인하였고, 제품의 특성 및 규격에 따라 모든 제품에 적용 가능한 기반 기술이 될 수 있음을 제시하고 있다.

3.1.2 코팅 층 성능 분석

위의 실험 방법에서 언급한 6가지 비율을 Table 1을 토대로 Sample 1~6을 시편에 코팅을 시킨 후 SST(Salt Spray Test)를 100시간 마다 총 1,000시간 동안 측정한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 6가지 비율과 Control로 코팅을 하지 않은 시편을 이용하여 측정하였으며, 그 결과 열 확산 코팅을 한 시편은 코팅을 실시하지 않은 시편보다 많은 양의 녹이 발생한 것을 확인하였다. Sample 1, 2, 3에서는 아연(Zn)과 알루미늄(Al)의 희생 부식으로 인해 백녹이 발생한 것을 확인 하였다. 그 중 Sample 2에서 400시간 이후까지 많은 백녹이 발생함에 따라 다른 비율에 비해 많은 희생부식이 일어난 것으로 확인하였다. 모재를 보호하기 위해 코팅 소재가 먼저 부식이 되어 1,000시간 이후에도 모재의 형상과 특성을 유지하는 것을 확인하였다. 반면에, 코팅되지 않은 시편은 100시간 이후에 심한 녹발생과 함께 모재의 형상에 심한 손상이 발생되었으며 1,000시간 이후에는 모재의 형상이 완전히 손실되었다.

열 확산 코팅을 한 6개의 시편에서 각 비율마다 차이를 보였는데, 이는 육안으로는 구분하기 힘든 점을 감안하여 100시간 마다 총 1,000시간 동안 녹으로 인해 늘어난 시편의 무게를 측정하였다. 그 측정값은 시편의 무게가 sample 마다 다르기 때문에 weight%로 환산하여 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 control의 weight%는 37.23%로 세 번째로 많이 증가한 것을 확인하였으며, sample 5,6의 경우는 control보다 더욱 취약한 내식성을 보여줌을 확인하였다. 반면에, sample 2의 weight%는 21.85%로 가장 작은 녹생성 비율을 나타냄으로서 코팅을 하지 않은 시편과 다른 sample 5,6과 비교하였을 때보다 sample 2의 비율로 열

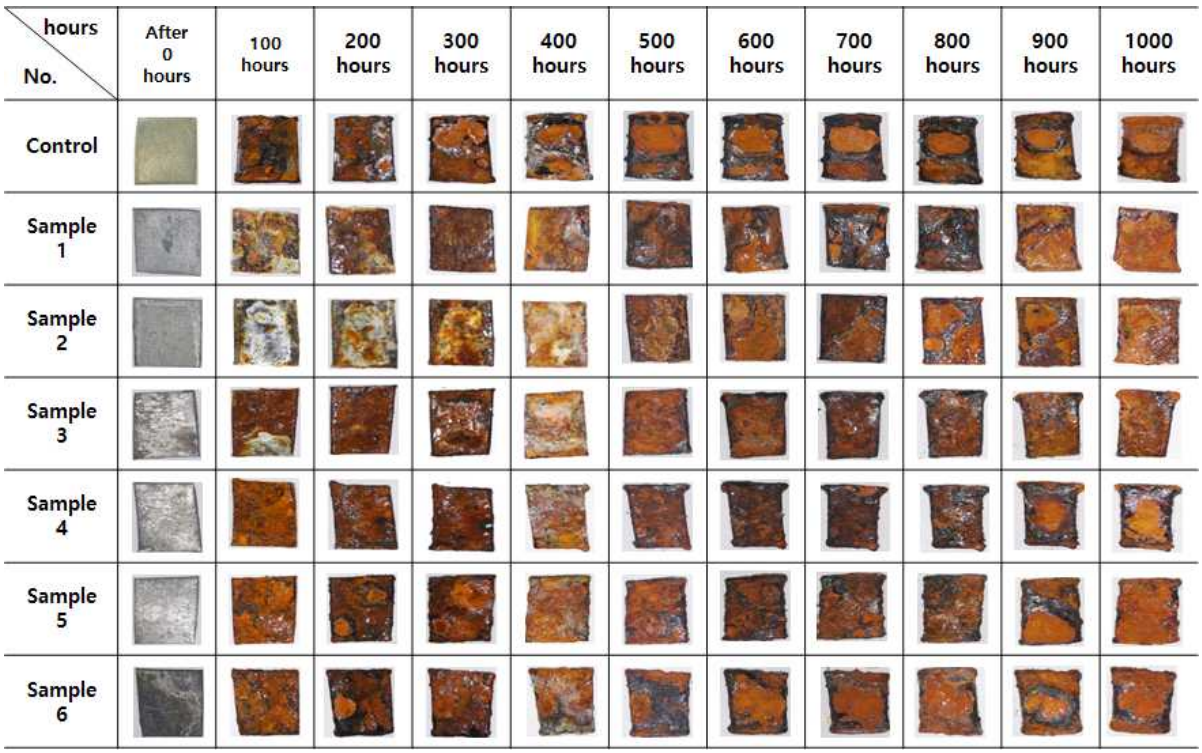


Fig. 5. Surface changes of thermal diffusion coated steel substrates in salt spray chamber for 1,000 hours.

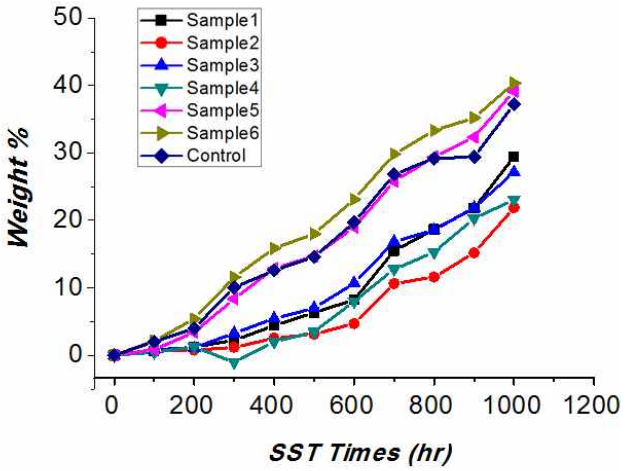


Fig. 6. Weight gain of thermal diffusion coated carbon substrates with time.

확산 코팅을 한 시편이 가장 작은 무게증가율을 보여 다른 비율보다 우수한 내식성을 확인하였다.

3.2 나사못을 이용한 Zn-Al 열 확산 코팅기술 응용

3.2.1 코팅 층 형태 및 성분 분석

Fig. 7은 나사못의 열 확산 코팅 전 후 색깔변화를 나타낸 것으로 탄소강 철판 코팅 결과와 마찬가지로 코팅 전과 비교하여 코팅 후 밝은 회색으로 Zn-Al 코팅층이 형성 되는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. Fig. 7(a)는 코팅 전 산처리를 통하여 표면의 거칠기가 증가된 나사못을 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 Zn-Al 열 확산 코팅된 나사못을 나타낸 것이다. 또한, 영상분석을 통하여 Zn-Al 열 확산 코팅이 나사못 머리 부분과 나사산, 나사골 전체적으로 코팅층이 골고루 형성됨을 확인됨에 따라 응용기술에 적용이 가능함을 확인하였다. 특히 나사못은 철판과 달리 많은 굴곡과 둥근 모양을 가지고 있어 섬세한 코팅이 필요한데, 본 연구에서 개발된 코팅공정은 간단하고 빠른 시간 안에 코팅이 전체적으로 균질하게 되었음을 확인하였다. Fig. 7(c)는 Zn-Al 열 확산 코팅 된 나사못의 코팅층 두께를 확인하기 위하여 E-SEM을 이용하여 관찰하였다. 확인 결과 나사못 위에 형성된 코팅층 두께는 2.80㎛, 3.34㎛, 3.61㎛으로 확인되었으며 이에 대한 평균 두께는 약 3㎛이며 탄소강 철판 결과와 비교하여 코팅층 두께가 얇게 형성되었지만, 나사못 위에 형성된 코팅층 두께가 전체적으로 고르게 형성되었음을 나타내었다.

3.2.2 코팅층 성능 분석

Zn-Al 열 확산 코팅된 나사못의 성능을 평가하기 위하여 염수분무시험을 1,000시간 동안 실시한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전반적으로 Control과 Sample 1~6의 염수분무시험 진행 시간이 증가함에 따라 나사못 코팅 층으로부터 적녹과 백녹 생성 비율이 증가되는 것을 볼 수 있었다.

Control은 코팅층이 존재하지 않는 금속 부품으로서 위 탄소강 철판의 결과와 마찬가지로 염수분무시험 100시간 만에 모든 면적이 적녹으로 덮이는 것을 확인할 수 있었고 이는 부식에 매우 취약하다는 것을 나타내고 있다. 반면에 Sample 1~6의 경우 전반적으로 control과 비교할 때 적녹 생성 속도가 현저하게 느렸지만 Sample 5, 6의 경우에는 100시간 만에 적녹이 면적의 90%이상을 차지하고 있어 내식성 향상 코팅에 부적합하다는 것을 알 수 있다. Sample 1~4는 100시간 까지 비슷한 적녹 생성 비율을 보여주다가 200시간 이후부터 Sample 2가 다른 코팅 비율과 비교하였을 때 우수한 내식성을 가지고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 위 탄소강 철판 염수분무시험과 비슷한 경향을 보여주고 있으며 열 확산 코팅비율이 금속제품에 관계없이 동일한 내식성을 나타내고 있어 재현성 측면에서 내식성 향상 물질로 적합하다는 것을 증명해주고 있다. 염수분무시험 400시간 이후부터는 육안으로 내식성을 판단하기가 어려워 녹

Fig. 7. Screw images before/after Zn-Al thermal diffusion coating. (a) Normal screw body and head before coating process, (b) Zn-Al thermal diffusion coated screw body and head after coating process and (c) cross section of Zn-Al thermal diffusion coated screw. The layer's thickness is about 3㎛.

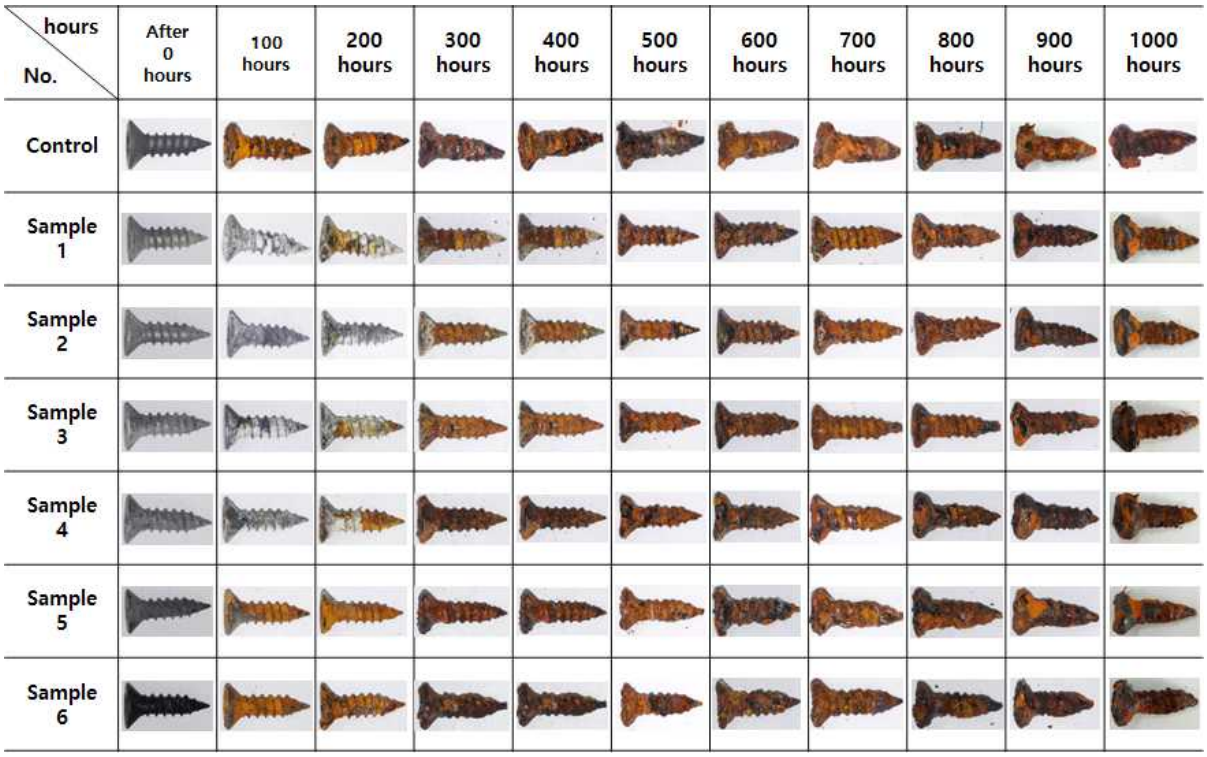


Fig. 8. Optical images of Zn-Al thermal diffusion coated screws with time.

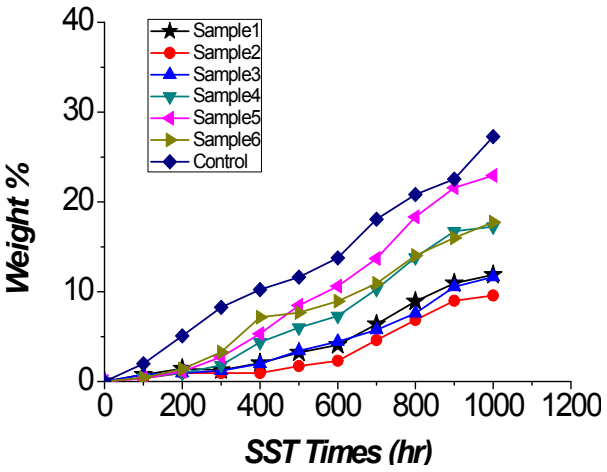


Fig. 9. Weight gain of thermal diffusion coated screws for 1,000 hours.

증가 데이터를 통하여 비교 분석하였다.

Fig. 9는 총 1,000시간 동안 Control과 Sample 1~6의 증가된 부식 물질 무게를 측정한 것이다. 염수분무시험 100시간 이후 Control은 2%의 무게 증가 비율로 코팅 된 시편에 비해 높았으며 코팅 된 시편은 0.3~0.7% 증가율로 확연한 차이를 보이지 않았다. 200시간도 마찬가지로 Control은 5%로 높은 무게 증가율을 보여주었지만 코팅된 시편은 0.9~1.3% 증가율로 확인되었다. 그 후, 400시간 이후부터는 코팅된 시편 Sample 1~6에서 각각 1.273%, 0.941%, 1.199%, 1.801%, 2.739%, 3.27%로 큰 차이를 보이기 시작하였다. 400시간에서 1,000시간까지 부식물의 무게가 계속해서 증가함을 보였다. 특히, Sample 2가 1,000시간 이후에 9.58%로 가장 낮은 무게 증가율이 확인되었다. 최종적으로 탄소강 철판 코팅 비율과 마찬가지로 Sample 2에 적용된 코팅비율이 내식성을 향상시키는 최적임을 재확인할 수 있었다.

코팅의 우수성을 평가하기 위하여 무도금 제품, 현재 상용화되어 시판되고 있는 내식성 코팅제품, Zn-Al 열 확산 코팅 된 제품 3개의 시편을 염수분무시험 1,200시간 동안 진행한 후 10% 황산을 이용하여 녹 제거를 하였고 어떤 시편의 코팅층이 기존 모재의 형상을 그대로 유지할 수 있는지 평가한 것을 Fig. 10에 나타내었다. 무도금 제품의 경우 1,200시간 후 표면에 형성된 녹을 제거 하였을 때 기존 나사못의 나사산이 모두 제거 된 것을 확인하였으며, 나사못의 머리 부분은 녹의 침투가 심하여 녹 제거에 어려움이 있었다. 현재 용융도금으로 코팅되어 시판되고 있는 나사못의 경우에도 마찬가지로 나사산이 제거된 것과, 머리 부분의 녹 침투 현상도 심각하게 진행된 것을 확인할 수 있었다. 반면에 Sample 2의 비율로 Zn-Al 열 확산 코팅된 제품의 경우 기존 모재의 나사산 형태를 유지하는 것을 보여주었고, 나사못의 머리 부분도 기존 모재의 모양과 비슷하게 유지된

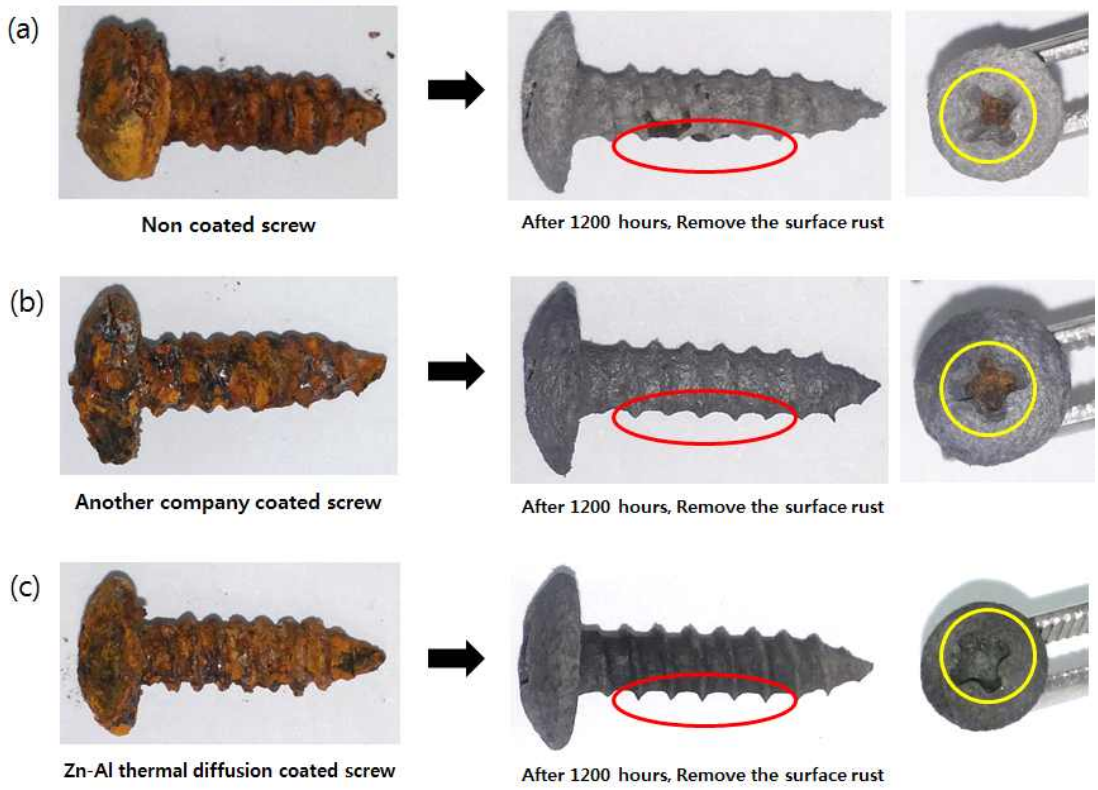


Fig. 10. The optical images of removed rust from screws. (a) Non coated screw, (b) commercial anti-corrosion screw and (c) Zn-Al thermal diffusion coated screw.

것을 확인하였다. 이로써 Zn-Al 열 확산 코팅이 나사못에 우수한 내식성을 부여함을 입증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 Zn-Al 열 확산 코팅을 이용한 금속 부품의 내식성을 향상시키기 위하여 아연(Zn), 알루미늄(Al) 금속 분말과 염화암모늄(NH_4Cl)의 혼합 분말 재료를 이용하여 열 확산 코팅 기술을 개발하고자 하였다. 다음과 같이 표면 성분 분석 및 내식성을 분석을 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(ㄱ) 시편의 열 확산 코팅 결과 짙은 회색 또는 밝은 회색으로 코팅층이 형성되는 것을 육안으로 확인하였고, 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 EDX을 통해 표면성분이 Fe 33.53%, Zn 53.16%, Al 1.05%, O 7.53%, C 4.74% 임을 확인하였다.

(ㄴ) Zn-Al 열 확산 코팅 기술을 이용한 코팅된 시료 및 금속부품의 두께를 측정하기 위하여 광학현미경을 이용해 단면을 관찰하였다. 그 결과, 코팅층 두께는 탄소강 철판의 경우 약 12㎛, 나사의 경우 약 3㎛인 것을 확인하였다.

(ㄷ) 코팅층 표면의 신뢰성 있는 데이터를 위해 X-선 회절 분석(XRD)을 통한 코팅층 표면 성분 분석을 하였고, 그 결과 철(Fe)과 아연(Zn)의 합금, 철(Fe)과 알루미늄(Al)의 합금이 확인되었다.

(ㄹ) Zn-Al 열 확산 코팅의 내식성을 평가하기 위하여 신뢰성 검사인 염수분무시험(Salt srpay testing)을 진행하였고, 그 결과 무도금 금속부품보다 Zn-Al 열 화간 코팅이 월등히 뛰어난 내식성을 보임을 확인하였다. 또한 아연(Zn)과 알루미늄(Al)의 비율에 따른 내식성 성능 비교를 진행하여 최적의 Zn-Al 혼합 분말 비율을 확립하였다. 최종적으로 상업화 가능성을 타진하기 위해 무도금 나사, 타사의 나사, Zn-Al 열 확산 코팅 나사를 염수분무시험 1,200시간 후 10% 황산을 이용해 철 시료 표면의 녹을 제거하여 모재 손상을 확인하였다. 그 결과 무도금 나사의 경우 나사산이 대부분 부식되어 사라져 평평한 모습을 보였고, 타사 나사의 경우에도 무도금 보다는 나사산의 형상이 남아 있지만 부식이 진행되어 많은 부분이 손상이 된 것을 확인하였다. 하지만 Zn-Al 열 확산 코팅 나사는 나사의 형태를 대부분 유지 하였으며 나사산의 뾰족한 부분까지 남아 있는 것을 확인함으로써 본 연구에서 개발한 코팅 기술이 우수한 내식성을 가지는 것을 입증하였다. 이러한 결과를 토대로 타 공정에 비해 비교적 짧은 처리 시간과 낮은 온도, 간단한

공정 절차 및 저렴한 설비로 이루어진 경제적이고 친환경적인 Zn-Al 열 확산 코팅 기술의 우수성을 입증하였다.

본 연구에서 개발한 코팅 기술은 기존 공정에서 사용되고 있는 6가 크롬과 같은 발암성 물질을 사용하지 않고, 고가의 장비를 이용하는 현재의 코팅 기술을 대체하는 새로운 경제적인 방법으로 제시하고자 한다.

References

1. M. S. Han, K. Y. Hyun and S. J. Kim, Corros. Sci. Tech., **12**, 233 (2013).
2. Yu, Tian, Dai and Wang, Eletrochimica Acta 97, 409 (2013).
3. Mizuno, Suzuki, Fujita and Hara, Corros. Sci., **83**, 217 (2014).
4. J. W. Park, K. H. Lee, H. J. Na, B. K. Park, Y. S. Nam and S. H. Hong, Corros. Sci. Tech., **12**, 27 (2013).
5. Wang, Akid, Corros. Sci., **50**, 1142 (2008).
6. J. Winiarski, J. Masalski, B. Szczygiel, Surf. Coating Tech., **236**, 252 (2013).
7. He, Li, Wang, Zhang, Qi and Gao, Mater. Lett., **56**, 554 (2002).
8. Liu, Yan, Dong, Y. Yang, Chu and Zhang, Corros. Sci., **75**, 220 (2013).
9. Lang and Yu, Surf. Coating Tech., **145**, 80 (2001).
10. Prasai, Tuberquia, R. Harl, G. K. Jennings and K. I. Bolotin, ACSNANO, 1102 (2012).
11. H. Y. Seo, K. H. Nam and K. I. Hong, J. Kor. Magnetics Soc., 42 (2012).
12. X. Xu, L. Zhu, W. Li and Liu, Lin. Appl. Surf. Sci., **257**, 5524 (2011).
13. J. Cui, X. Wang, Y. Yuan, X. Guo, X. Gu and Jian, Chem. Eng. J., **241**, 184 (2014).
14. Z. Zhan, Y. He, D. Wang and W. Gao, Intermetallics, **14**, 75 (2006).
15. A. P. Yadav, H. Katayama, K. Noda, H. Masuda, A. Nishikata, T. Tsuru, Electrochim. Acta 52, 2411 (2007).
16. O. Kluth, B. Rech, L. Houben, S. Wieder, G. SchoÈpe, C. Beneking, H. Wagner, A. Loffl, H. W. Schock, Thin Solid Films, **351**, 247 (1999).
17. D. Chaliampalias, M. Papazoglou, S. Tsipas, E. Pavlidou, S. Skolianos, G. Stergioudis, G. Vourlias, Appl. Surf. Sci., **256**, 3618 (2010).
18. J. Hirmke, M.-X. Zhang, D. H. StJohn, Surf. Coating Tech., **206**, 425 (2011).
19. D. Zeng, S. Yang, Z. D. Xiang, Appl. Surf. Sci., 5175 (2012).