



제품 형태에 따른 도금층 및 부식 특성의 연구

김하늘^a, 홍민규^b, 장병록^{a,*}

^a인하대학교 제조혁신전문대학원 첨단소재공정공학과, ^b주식회사 하이피텍

Study of plating layer composition and corrosion characteristics according to product type

Ha-Neul Kim^a, Min-Gyu Hong^b, Byoung-Lok Jang^{a,*}

^aDepartment of Materials Processing and Engineering, Inha Manufacturing Innovation School, Incheon 21999, Republic of Korea

^bhiptech Co., Ltd., Ansan-si, Gyeonggi-do 15611, Republic of Korea

(Received 21 February, 2023 ; revised 12 May, 2023 ; accepted 22 May, 2023)

Abstract

The lifetime and corrosion resistance of the coating depends on its thickness and composition. We checked how the plating progressed according to the shape of the product to be plated. There was no significant difference in the composition or thickness of the plating according to the shape of the separately plated products. Samples of different shapes collected from products with complex shapes showed no significant difference in composition depending on the shape, but significant differences in thickness. This difference is due to the difference in applied current density depending on the shape of the product.

Keywords : Plating; Etching; Corrosion; Zn-Ni Alloy; Microstructure.

1. 서 론

철강 재료는 생활 전반에 고루 쓰이는 인류의 필수 소재이다. 그러나 산화되기 쉬운 특성으로 인해 사용처에 제한이 발생한다. 이를 해결하기 위해 합금하여 스테인리스 스틸을 만들거나 도금을 통한 방식 처리를 진행한다. 철강에 사용되는 도금은 주로 아연의 희생 부식을 통한 방식을 원리로 하는 경우가 많다. 그러나 아연의 희생 부식으로 인해 물성 약화와 내식성 하락 등의 문제가 발생하므로 더 나은 성능을 가지는 도금 방법들이 제시되어왔다[1]. 현재는 기존 아연 도금의 단점을

개선한 다양한 아연 합금 도금이 사용되고 있으며, 이 중 Zn-Ni 합금 도금은 뛰어난 내식성과 물성, 부식 특성뿐 아니라 카드뮴을 포함하지 않아 환경적으로도 안전하므로 다양한 분야에서 사용되고 있다[2, 3, 4].

Zn-Ni 합금 도금은 기본적으로 Zn 도금의 희생 부식에 기반한 내식성을 제공한다. 이러한 부식 특성에 관한 연구는 과거부터 지속되어 왔다[5]. Zn-Ni 합금 도금은 합금상에 따라 내식성에 차이가 있다[6, 7]. 따라서 온도, 도금욕 첨가제를 통해 도금 공정의 효율화나 합금상의 통제 등을 시도하는 연구가 진행되어 왔으며, Ni의 함량과 Zn-Ni 합금 도금의 내식성의 상관관계에 대한 연구도 진행되어왔다[8, 9]. 또한 전류의 패턴을 통해 도금층의 구조적 변화를 야기하여 내식성을 향상시키

*Corresponding Author: Byoung-Lok Jang
Department of Materials Processing and Engineering,
Inha Manufacturing Innovation School
Tel: +82-032-720-9054 ; E-mail: jang.bl@inha.ac.kr

는 연구도 진행되었다[10]. 최근에는 Zn-Ni 기반으로 추가적인 합금을 하거나 소지와와의 관계에 대한 연구도 진행되고 있다[11, 12, 13].

도금 산업의 경우 수동으로 진행하던 과거와 달리 전 공정을 자동화하여 생산성과 안정성을 높이고 있다. 제품에 사용된 도금이 충분한 내식성과 수명을 확보하기 위해서는 밀착성, 균일성, 두께 등 다양한 기준을 충족할 수 있어야 한다. 도금 환경은 온도, 도금욕의 조성 및 농도, 전류 밀도 등의 다양한 변수가 존재하며 이러한 것들이 적절히 통제되어야만 기준을 충족시킬 수 있는 제품을 만들 수 있다.

하지만 도금 공정에서의 변수는 상기한 것 외에도 존재하는데, 이 중 하나가 제품의 형태이다. 전기도금의 특성상 제품에 전류가 흐르게 되는데 제품의 형태에 따라 제품에 가해지는 전류밀도에 차이가 발생할 수 있다[14]. Zn-Ni 합금 도금이 개발되고 상용화된 이래로 다양한 변수에 대한 도금 특성 연구가 진행되었지만 제품 형태와 도금 특성의 직접적인 관계를 규명하는 연구는 많지 않았다 [15, 16, 17]. 따라서 본 연구에서는 자동화 공정을 통해 제조된 Zn-Ni 합금 도금 제품의 형태에 따른 도금 특성 및 조성, 부식 특성을 확인하였다.

2. 실험방법

연구에 사용된 제품은 (주)하이퍼텍에서 자동화 공정을 통해 생산된 자동차용 heat pipe(백색 크로메이트)와 vibration pipe(흑색 크로메이트)이다. 흑색 제품과 백색 제품은 각각 다른 도금욕에서 도금되었다. 각 제품의 도금 조건은 표 1에 기재

되어있다. 제품의 형상에 따른 도금 특성을 확인하기 위하여 각 제품으로부터 BR(Black Round), BF(Black Flat), WR(White Round), WF(White Flat)로 구분하였다. 그림 1은 각 시편의 채취 위치를 보여준다. BR과 BF는 같은 도금욕에서 각각 도금된 제품으로부터 채취한 시편이며, WR과 WF는 하나의 복잡한 형태의 제품으로부터 시편을 채취하였다.

도금층의 표면 및 단면, 부식층의 관찰은 keyence사의 디지털 광학 현미경(VHX-7000N)을 통해 진행하였다. 국가표준(KS D 0246)을 참고하여 현미경을 통한 두께 측정을 진행하였으며, 디지털 현미경에서 제공하는 길이 측정 프로그램을 사용하여 두께를 측정하였다.

도금 제품의 성분 검사를 위해 Rigaku 사의 WD-XRF(Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence spectroscopy, ZSX Primus IV)를 통한 성분 분석을 진행하였다. XRF 분석을 위해 원통형 시편의 경우 바이스를 이용하여 평평하게 만든 뒤 분석하였다. XRF 분석은 평평한 표면으로부터 X-Ray가 침투할 수 있는 깊이까지의 모든 원소를 측정한다.

도금층의 부식 형태를 확인하기 위하여 각 제품의 단면을 Nital 1.5% 용액으로 15초간 에칭하였다. 부식된 단면의 성분 분포를 확인하기 위하여 주사전자현미경(JSM-7100F)를 통해 단면 관찰과 EDS mapping(AZtec X-Max)을 진행하였다. 실제 제품의 부식은 표면으로부터 진행되지만 완벽히 부식된 도금층의 형태를 확인하기 위해서 도금층의 단면을 부식시켰다.

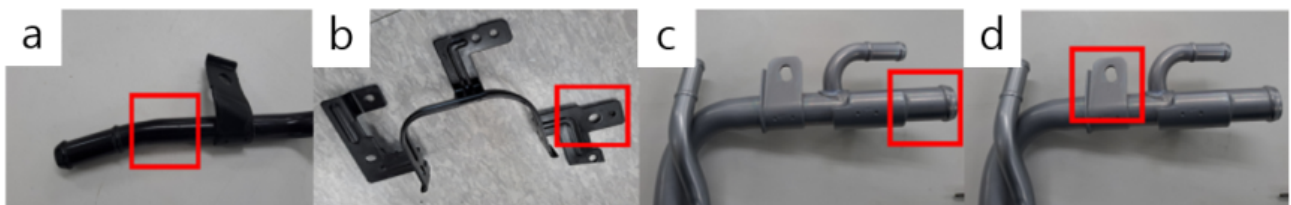


Fig. 1. Sample position for each color and type. (a) BR(Black Round), (b) BF(Black Flat), (c) WR(White Round), (d) WF(White Flat).

Table 1. Plating conditions

	흑색 제품	백색 제품
전해액 조성 및 농도	KCl(270~290 g/L), Ni(8~15 g/L), H ₃ BO ₃ (18~25 g/L), Zn(30~38 g/L)	KCl(270~290 g/L), Ni(6~13 g/L), H ₃ BO ₃ (18~25 g/L), Zn(34~45 g/L)
전해액 PH	3.5~4.0	3.5~4.0
크로메이트 조건	10~15%, 30 sec	10~15%, 30 sec
전류밀도	2 A/dm ²	2 A/dm ²

3. 결과 및 고찰

3.1. 도금층 두께 측정

도금층의 두께는 도금의 수명과 직관적으로 관련되는 요소이다. 특히 철 소지에 진행되는 Zn계 도금의 경우 Zn의 희생부식을 통해 내식성을 확보하는데, 이로 인해 부식환경에서는 필연적으로 도금층의 Zn이 산화되어 소실된다. 따라서 도금의 두께가 두꺼울수록 희생될 Zn의 양이 많아지므로 수명 또한 증가하게 된다. 다만 도금의 두께가 증가할 경우 제품의 무게 또한 증가하게 된다. 또한 소지 상의 도금 성분은 소지의 격자를 따라 도금되어 물성이 증가하는 반면 도금의 두께가 지나치게 두꺼워질 경우 도금 성분 원소의 격자를 형성하여 해당 소재의 물성을 가지게 된다. 따라서 도금 두께는 충분한 수명과 물성을 가지는 수준을 파악하여 조절해야 한다.

제품의 형태에 따른 도금 두께의 차이를 확인하기 위하여 제품의 단면을 확인하였다(그림 2).

OM을 통해 측정한 도금층의 두께는 BR = 7.50 μm, BF = 8.52 μm, WR = 9.49 μm, WF = 4.84 μm이었다. BR과 BF의 경우 같은 도금욕에서 각각 도금된 것이므로 도금층의 형성 중 서로 간섭하지 않았다. 따라서 약 1 μm의 두께 차이는 제품의 형태에서 기인하였다. 하지만 해당 제품의 도금 두께가 위치에 따라 7~9 μm의 범위를 가지기 때문에 유의미한 차이라고 보기 어렵다. WF는 WR의 절반 정도로 도금층의 두께가 얇았다. 이는 WR과 WF의 경우 서로 연결되어 있어서 도금 시

서로 간에 영향을 주기 때문이다. 도금의 두께는 Faraday 법칙에 의해 전류 밀도와 비례한다(식 1) [18]. 따라서 같은 조건에서 도금이 진행되었음에도 도금 두께에 차이가 발생한 것을 통해 평평한 형태보다 원통형에서 더 큰 전류밀도가 가해졌음을 알 수 있다.

$$d = \frac{M \cdot \theta \cdot j \cdot t}{\rho \cdot z \cdot F} \tag{1}$$

여기서 d 는 도금 두께, M 은 석출된 도금의 질량, θ 는 전류 효율, j 는 국부 전류밀도, t 는 도금 시간, ρ 는 금속의 밀도, z 는 원자가, F 는 Faraday 상수이다.

해당 식을 사용하여 도금 조건에 따른 두께의 이론값을 계산하면 다음과 같다(표 2).

계산에 사용한 도금 조건은 표 1에 기재되어있으며, 산성 전기 도금에서의 전류 효율은 1에 가깝기 때문에 전류 효율은 1로 가정하였다. 또한 해당 식에서는 합금을 반영하기 어렵기 때문에 각 성분 에 대한 도금 두께를 계산하고, 도금욕 조성에 기반하여 두께를 계산하였다. 측정된 도금 두께는 이론적인 계산을 통해 도출된 값에 비해 절반가량 얇았다. 이러한 오차의 원인으로서는 실제 도금 공정에서는 도금 조성이 도금욕 조성과 완벽하게 비례하지 않으며, 해당 제품이 통제된 실험을 통해 생산된 것이 아닌 실제 공정에서 생산된 제품이기 때문에 공정 조건이 정확하지 않았을 가능성도 있다. 또한 해당 식에서 전류 밀도는 제품에 가해지는 국부 전류 밀도를 사용해야 하지만 계산에 사

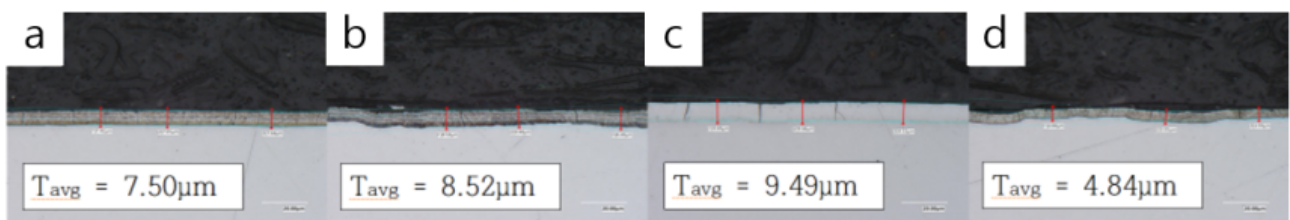


Fig. 2. Measurement of the cross-section thickness of the plating layer. X 2000 (a) BR, (b) BF, (c) WR, (d) WF.

Table 2. Calculation and comparison of plating thickness

	흑색 제품	백색 제품
d_{Ni}, d_{Zn} 계산식	$d_{Ni} = (58.70 \times 1 \times 0.02 \times 1800) / (8.91 \times 2 \times 96500) = 0.001229 \text{ cm} = 12.29 \mu\text{m}$ $d_{Zn} = (65.38 \times 1 \times 0.02 \times 1800) / (7.14 \times 2 \times 96500) = 0.001708 \text{ cm} = 17.08 \mu\text{m}$	
Zn : Ni	전해액 농도: Zn(30~38 g/L), Ni(8~15 g/L) 전해액 농도로부터 Zn : Ni = 34 : 11.5	전해액 농도: Zn(34~45 g/L), Ni(6~13 g/L) 전해액 농도로부터 Zn : Ni = 39.5 : 9.5
$d_{이론값}$ 계산식	$d = (11.5d_{Ni} + 34d_{Zn}) / (11.5 + 34) = 15.87 \mu\text{m}$	$d = (9.5d_{Ni} + 39.5d_{Zn}) / (9.5 + 39.5) = 16.15 \mu\text{m}$
$d_{이론값}$	15.87 μm	16.15 μm
$d_{실측값}$	BR = 7.50 μm, BF = 8.52 μm	WR = 9.49 μm, WF = 4.84 μm

용한 전류 밀도는 공정상 가해준 전류 밀도를 사용하였기 때문에 이러한 오차가 발생한 것으로 보인다. 다만 이론적 계산값과 비교하였을 때, 실제 제품에서의 도금 두께에서는 제품 형태에 따른 차이가 있었으며 이것이 온도, 표면 형태, 제품 형태 등 식에서 반영하지 못하는 조건으로부터 기인하였음을 유추할 수 있다. 이를 통해 기존의 이론에 반영되지 않은 요소가 도금층의 형성에 영향을 준다는 것을 확인하였다.

3.2. 도금층 조성 확인

제품 형태에 따른 도금층의 조성 차이를 확인하기 위해 XRF를 통한 성분 분석을 진행하였다(표 3).

XRF는 제품의 외부로부터 분석이 진행되었으므로 도금층 외부의 크로메이트 피막부터 내부의 철 소지까지의 성분이 모두 분석되었다. WF의 경우 Fe의 비율이 더 높는데, 이는 WF 시편의 도금 두께가 비교적 얇기 때문에 철 소지의 비율이 증가한 것이다. 시험결과를 보면 기타 원소의 비율이 상당히 높는데 대부분 장비 사용 환경에 따른 O의 검출로 인한 것이다. 또한 산화된 부분의 O도 포함되어 있다. 기타 원소에 포함된 Cr, Si, C 등은 제품 표면에 진행된 크로메이트 처리로 인한 피막의 성분이 검출된 것이다. 크로메이트 피막은 매

우 얇기 때문에 XRF 검출 범위에서 매우 적은 비율을 차지한다.

전기 도금의 경우 피도금체의 표면에 이온을 증착시켜 도금하기 때문에 Zn과 Ni을 도금하면 도금층에는 높은 순도의 Zn과 Ni이 도금된다. 따라서 XRF결과의 Zn과 Ni은 도금층에서 기인하였으며, 도금층의 성분은 Zn과 Ni뿐이라고 가정할 수 있다. 그러므로 분석 결과 중 도금층에 포함된 Ni의 비율을 확인하기 위하여 Ni/(Zn+Ni) 비를 확인하였다(표 4). Ni 함량비는 흑색 시편이 백색 시편보다 높았고, 평면 시편이 원통 시편보다 높았다. 흑색은 백색에 비해 Ni의 함량비가 높는데, 이는 도금욕 조성으로부터 기인하였다. 도금욕의 Ni과 Zn의 비율이 합금에 정확히 비례하는 것은 아니지만 Ni의 비율이 높은 도금욕에서 더 높은 Ni 함량비를 가진다[9]. S. Y. Kang의 연구에 의하면 전류밀도가 높을수록 도금층의 Ni 농도가 감소하였다[19]. 따라서 원통형 시편의 Ni 함량이 비교적 낮은 것 또한 해당 형태에서 더 높은 전류밀도가 가해지기 때문이라고 볼 수 있다.

Zn-Ni 도금에서 도금층의 Ni 함량은 경도와 같은 물성뿐 아니라 내식성에도 영향을 주는 요소이다. Zn에 Ni을 첨가할 경우 경도와 내식성이 향상된다. 이러한 효과는 Ni 함량에 의존한다. 또한 합금의 상도 내식성에 영향을 미치는데 γ 상의 비율이 높을수록 내식성이 뛰어나다[7].

Table 3. XRF elemental analysis

시편명	XRF 성분분석 결과				
	시험항목	단위	시험방법	검출한계	시험결과
BR	Zn (Zinc)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	31.6
	Fe (Iron)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	11.1
	Ni (Nickel)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	8.3
	기타 (C, O, Si, S, Cl, K, Cr 등)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	49.1
BF	Zn (Zinc)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	30.8
	Fe (Iron)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	9.5
	Ni (Nickel)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	8.7
	기타 (C, O, Si, S, Cl, Cr, Al, K 등)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	51.1
WR	Zn (Zinc)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	37.1
	Fe (Iron)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	11.8
	Ni (Nickel)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	7.9
	기타 (C, O, Si, Al, Cr 등)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	43.3
WF	Zn (Zinc)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	36.9
	Fe (Iron)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	21.0
	Ni (Nickel)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	8.2
	기타 (C, O, Si, Cr, Al 등)	wt%	WD-XRF (Element mode)	-	33.8

Table 4. Ni/(Zn+Ni) ratio of plating layer of each sample

시편명	Ni/(Zn+Ni)비	%
BR	$8.3/(31.6 + 8.3) = 0.208$	20.8%
BF	$8.7/(30.8 + 8.7) = 0.22$	22.0%
WR	$7.9/(37.1 + 7.9) = 0.176$	17.6%
WF	$8.2/(36.9 + 8.2) = 0.182$	18.2%

3.3. 도금층 부식 거동 확인

도금층의 부식 형태를 확인하기 위해 제품의 단면을 Nital 1.5% 용액으로 에칭하였다(그림 3). 이를 통해 해당 제품의 도금층이 부식될 때 미세한 마이크로 크랙이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 충분한 양의 Ni이 포함된 Zn-Ni 합금 도금층에서 관찰되는 현상으로, 도금층 내부의 아연이 희생 부식으로 인해 우선적으로 사라지면서 도금층에 응력이 발생하여 생성된다[7, 20, 21, 22, 23, 24]. 본 실험에서는 도금층의 단면에 산을 떨어뜨려서 도금층이 전부 부식되었지만, 실제 도금 제품에서는 부식 환경에 노출되는 외부에서부터 부식이 진행된다. 이때 발생하는 마이크로 크랙은 부식 전류를 분산시키며 흐름을 방해하여 제품이 더 높은 내식성을 가지게 한다.

실제 도금층의 부식이 철 소지를 보호하는지 확인하기 위해 부식된 시편의 단면에 대한 EDS mapping을 진행하였다(그림 4). EDS mapping 결과에서 산소가 도금층에 주로 분포하는 것을 통

해 단면의 부식 과정에서 도금층이 우선적으로 부식됨을 확인할 수 있었다. Fig 4에서 산소의 분포를 보면 도금층에 집중되어 분포하고 있는데 이는 도금층에서 우선적으로 부식되어 생성된 아연 산화물로 인한 것이다. 또 도금층과 철 소지의 구분이 뚜렷한데 이는 전기 도금의 경우 합금화 열처리를 진행하지 않기 때문이다.

4. 결 론

1. OM을 통한 도금층 두께 측정 결과 각각 도금된 제품에서는 형태에 따른 도금 두께는 BF가 $8.52 \mu\text{m}$, BR이 $7.50 \mu\text{m}$ 로 약 12% 더 두꺼웠다. 하지만 복잡한 형태의 제품에서 채취된 다른 형태의 시편에서는 도금 두께가 WR는 $9.49 \mu\text{m}$, WF는 $4.84 \mu\text{m}$ 로 약 2배 정도 차이가 났다. 이를 통해 제품의 형태가 도금층 형성에 영향을 주며, 서로 연결되어 있을 때는 평평한 형태보다 원통형에서 도금층의 형성이 원활하다는 것을 확인하였다.

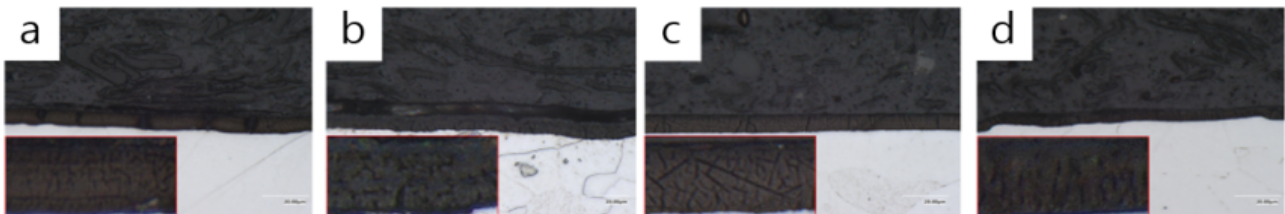


Fig. 3. Cross-section corrosion of plating layer, Nital 1.5%. X 2000 (a) BR, (b) BF, (c) WR, (d) WF.

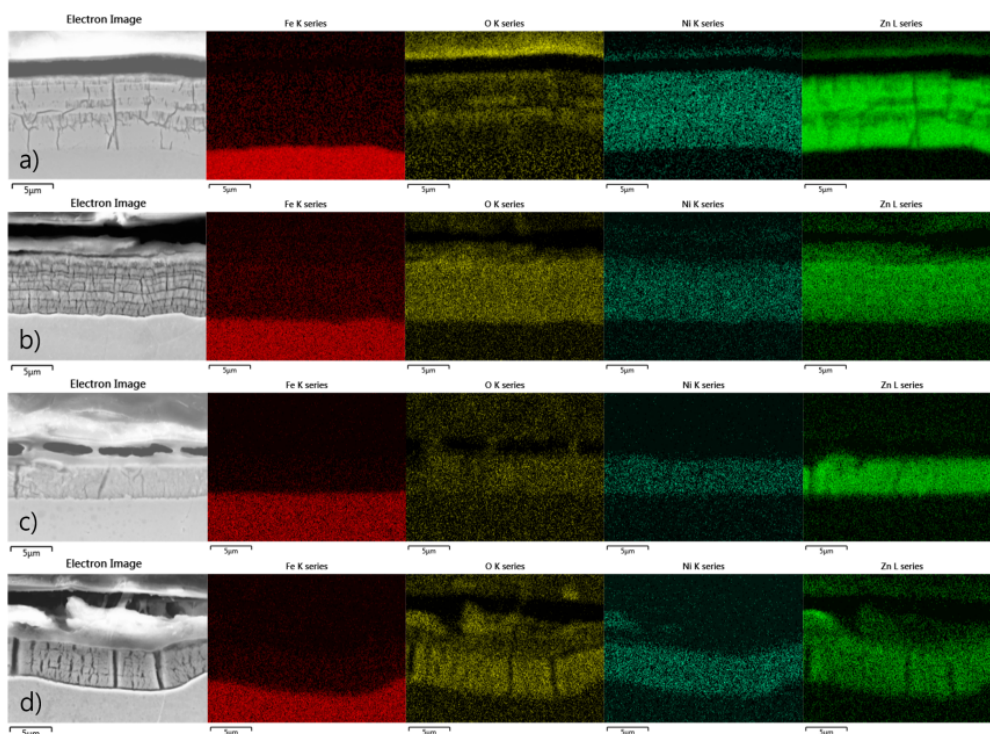


Fig 4. EDS mapping. (a) BR, (b) BF, (c) WR, (d) WF.

2. XRF를 통해 도출된 Ni/(Zn+Ni)비에서 흑색 크로메이트 제품은 BF가 22.0%, BR이 20.8%로 평평한 시편이 1.2%의 Ni을 더 포함하였고, 백색 크로메이트 제품은 WF가 18.2%, WR이 17.6%로 평평한 시편이 0.6%의 Ni을 더 포함하였다. 도금 두께 측정 결과와 조성 분석 결과를 통해 평평한 형태보다 원통형의 제품에서 더 큰 전류밀도가 가해진다는 것을 확인하였다.
3. SEM과 EDS를 통해 모든 제품에서 부식 시 내식성에 기여하는 마이크로 크랙을 확인할 수 있었다. 이를 통해 해당 제품에서 얻어진 도금층의 조성은 내식성을 확보하는 데에 충분함을 확인하였다.
4. 도금층의 두께와 조성은 도금의 내식성과 수명에 직접적인 영향을 주기 때문에 형태에 따른 도금 특성의 차이를 줄이는 연구가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 공정품질기술개발사업(혁신형R&D) 지원에 의한 연구임 [S3000860]

References

- [1] G. D. Wilcox, D.R. Gabe, Electrodeposited zinc alloy coatings, *Corros. Sci.*, 35 (1993) 1251-1258.
- [2] Y. P. Lin, J. R. Selman, Electrodeposition of corrosion-resistant Ni-Zn alloy, *J. Electrochem. Soc.*, 140 (1993) 1299-1303.
- [3] R. Fratesi, G. Roventi, Corrosion resistance of Zn-Ni alloy coatings in industrial production, *Surf. Coat. Technol.*, 82 (1996) 158-164.
- [4] A. Conde, M. A. Arenas, J. J. Damborenea, Electrodeposition of Zn-Ni coatings as Cd replacement for corrosion protection of high strength steel, *Corros. Sci.*, 53 (2011) 1489-1497.
- [5] M. Pushpavanam, S. R. Natarajan, K. Balakrishnan, L. R. Sharma, Corrosion behaviour of electrodeposited zinc-nickel alloys, *J. Appl. Electrochem.*, 21 (1991) 642-645.
- [6] G. C. Ye, S. Y. Choi, H. J. Shin, D. S. Ahn, Microstructure of Zn-Ni alloy electrodeposit, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 21 (1988) 10-18.
- [7] T. Oriti, A comparative study of gamma-phase zinc-nickel deposits electroplated from various alkaline and acid systems, *Nanf Surf. Tech. W.P.*, 79 (2014) 1-16.
- [8] H. T. Kim, S. K. Jang, W. S. Chung, Effect of additives on surface properties of Zn-Ni alloy coating, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 31 (1998) 191-198.
- [9] A. Farooq, S. Ahmad, K. Hamad, K. M. Deen, Effect of Ni concentration on the surface morphology and corrosion behavior of Zn-Ni alloy coatings, *Metals*, 12 (2022) 96.
- [10] J. S. Kim, R. H. Song, S. I. Pyun, The principle and practice of pulse plating, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 21 (1988) 19-27.
- [11] N. Eliaz, K. Venkatakrishna, A. C. Hegde, Electroplating and characterization of Zn-Ni, Zn-Co and Zn-Ni-Co alloys, *Surf. Coat. Tech.*, 205 (2010) 1969-1978.
- [12] Y. wang, Study on Zn-Ni electrodeposited coating on 40Mn steel as construction material and its corrosion resistance in simulated concrete pore solution, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 17 (2022) 220752.
- [13] B. Abedini, N. P. Ahmadi, S. Yazdani, L. Magagnin, Electrodeposition and corrosion behavior of Zn-Ni-Mn alloy coatings deposited from alkaline solution, *Trans. Nonferrous Met. Soc. Chi.*, 30 (2020) 548-558.
- [14] T. W. Sohn, J. B. Ju, Theoretical analysis of secondary current distributions for electrode with a projection part in electroplating system, *J. Kor. Electrochem. Soc.*, 12 (2009) 317-323.
- [15] M. M. Abou-krisha, F. H. Assaf, A. A. Toghan, Electrodeposition of Zn-Ni

- alloys from sulfate bath, *J. Solid State Electrochem.*, 11 (2007) 244-252.
- [16] C. Lei, H. F. Alesary, F. Khan, A. P. Abbott, K. S. Ryder, Gamma-phase Zn-Ni alloy deposition by pulse-electroplating from a modified deep eutectic solution, *Surf. Coat. Technol.*, 403 (2020) 126434.
- [17] T. V. Byk, T. V. Gaevskaya, L. S. Tsybul'skaya, Effect of electrodeposition conditions on the composition, microstructure and corrosion resistance of Zn-Ni alloy coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 202 (2008) 5817-5823.
- [18] K. H. Lee, Application of plating simulation for pcb and pakaging process, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19 (2012) 1-7.
- [19] S. Y. Kang, Effect of current density, temperature and eletrolyte concentration on Composition of Zn-Ni Electrodeposits, *J. Kor. Converg. Soc.*, 8 (2017) 307-312.
- [20] A. Chakraborty, A. Monda, A. K. Halder, M. Dutta, S. B. Singh, Evolution of microstructure of zinc-nickel alloy coating during hot stamping of boron added steels, *J. Alloys Compd.*, 794 (2019) 672-682.
- [21] D. W. Sitar, M. Sagiya, T. Hara, Corrosion of Ni-Zn electrodeposited alloy, *Transactions ISIJ*, 23 (1983) 959-966.
- [22] G. C. Ye, H. J. Shin, Corrosion of Ni-Zn electrodeposited alloy, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 21 (1988) 39-46.
- [23] M. R. Lambert, R. G. Hart, H. E. Townsend, Corrosion mechanism of Zn-Ni alloy electrodeposited coatings, *SAE trans.*, 92 (1983) 1153-59.
- [24] W. Tian, F. Q. Xie, X. Q. Wu, Z. Z. Yang, Study on corrosion resistance of electroplating zinc-nickel alloy coatings, *Surf. Interface Anal*, 41 (2009) 251-254.