

고농도 염소 가스 환경에서의 합금 종류에 따른 부식 거동 연구

한덕현^{1,2} · 정우철¹ · 공만식^{1,†}

¹고등기술연구원 신소재공정센터, 용인시 처인구 백암면 고안로51번길 175-28

²아주대학교 신소재공학과, 수원시 영통구 월드컵로 206

(2025년 1월 23일 접수, 2025년 2월 19일 수정, 2025년 2월 21일 채택)

Study on the Corrosion Behavior of Various Alloys in High-Concentration Chlorine Gas Environments

Deokhyun Han^{1,2}, Woo-Chul Jung¹, and Man-Sik Kong^{1,†}

¹Advanced Material & Process Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin-si, 17180, Korea

²Department of Materials Science and Engineering, Ajou University, Suwon-si, 16499, Korea

(Received January 23, 2025; Revised February 19, 2025; Accepted February 21, 2025)

High-concentration chlorine (Cl_2) gas is widely used in industries such as chemical processing, pharmaceuticals, electronics manufacturing, and gas treatment. Due to its highly reactive nature, it can also accelerate material degradation, leading to reduced equipment durability and increased maintenance costs. Understanding the corrosion behavior of different alloys in Cl_2 environments is crucial for enhancing process stability and extending equipment lifespan. This study analyzed corrosion behaviors of Co-Ni-Cr, Co-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni, Cu, and Zn-Al-Cu alloys in high-concentration Cl_2 gas environments. Results revealed that Co-Ni-Cr and Co-Cr-Ni alloys exhibited superior corrosion resistance due to formation of stable Cr_2O_3 protective layers, whereas Fe-Cr-Ni alloys provided intermediate resistance. Cu and Zn-Al-Cu alloys showed varying corrosion behaviors depending on environmental factors such as humidity and oxide layer stability. These findings emphasize the critical role of alloy composition and protective oxide layers in reducing Cl_2 -induced corrosion. By providing a comprehensive analysis of different alloy systems, this study provides insights into optimizing material selection for Cl_2 gas applications, contributing to improved industrial process stability and enhanced durability.

Keywords: Chlorine gas, Moisture effect, Co-Cr-Ni, Co-Ni-Cr, Gas Corrosion

1. 서론

고농도 Cl_2 (Chlorine) 가스는 다양한 산업 공정에서 널리 사용되는 화학물질로, 특히 화학 공정, 제약, 가스 처리 장비 등 부식성 환경에서 장비와 배관 소재의 내구성을 크게 저하시킬 수 있다. 이러한 환경에서 금속 소재의 내부식성은 장비의 수명과 공정 안정성에 중요한 영향을 미친다. Cl_2 가스는 금속과 반응하여 염화물 화합물(Metal Chloride)을 형성하며, 이 과정에서 부식이 진행된다. 부식 생성물이 표면에서 탈락하면 지속적인 부식을 유발하여 장비 성능 저하 및 유지보수 비용 증

가로 이어질 수 있다 [1].

Cl_2 가스 환경에서 수분(H_2O)의 존재는 부식 속도를 더욱 가속화하는 주요 요인 중 하나로 알려져 있다. 건조한 환경에서는 Cl_2 가스가 금속 표면과 직접 반응하지만, 수분이 존재할 경우 Cl_2 가스는 염화수소(HCl) 또는 염산($\text{HCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 형태로 전환되어 금속 표면에 더욱 공격적인 부식 반응을 일으킨다. 이러한 환경에서 사용되는 소재는 내식성을 유지하면서도 경제성을 고려하여 적합한 재료를 선택하는 것이 중요하다 [2].

연구 대상 소재는 각각의 물리적, 화학적 특성에 따라 의료, 항공, 화학 공정 등 특정 응용 분야에서 잠재적으로 활용되고 있는 소재로써, Co-Ni-Cr계 합금과 Co-Cr-Ni계 합금은 높은 내식성과 기계적 강도로 인해 항공기 터빈 부품이나 의료용 임플란트 및 반도체 공정용

[†]Corresponding author: mskong@iae.re.kr

한덕현: 선임연구원, 박사과정, 정우철: 선임연구원, 공만식: 수석연구원

밸브의 다이어프램에서 사용되고 있으며 [3], 특히 Cr_2O_3 보호층이 Cl_2 가스 환경에서의 부식 저항성을 향상시킬 것으로 기대된다. 또한 Fe-Cr-Ni계 합금은 스테인리스강 계열로 고온 환경에서도 안정적이며, 에너지 설비 및 발전소 장비와 같은 부식성 환경에서 사용되며, Cl_2 가스 환경에서의 Cr_2O_3 보호층 형성 및 안정성 평가가 필요하다.

Cu와 Zn-Al-Cu 합금은 내식성이 비교적 낮지만, 경제성이 중요한 부품이나 전기적, 열적 특성을 활용한 배관 시스템에서 사용되고 있다. Cu는 전기 및 열전도성이 뛰어나 산업 배관이나 열교환기 부품 등 특정 환경에서 여전히 활용 가능성이 있으며, 이를 고농도 Cl_2 환경에서의 성능을 확인하기 위해 선정하였다. 특히, 건식 환경에서는 Cl_2 와의 반응으로 CuCl_2 가 형성되더라도 Cu 할라이드 화합물은 증기압이 Al에 비하여 낮기 때문에 Cu 식각이 어려운 부분이 있으며 탈착이 쉽지 않음에 따라 [4], 건조한 조건에서의 보호층으로 작용하여 잠재적 활용성을 평가하기 위해 포함하였다. Zn-Al-Cu는 경량화 및 산화 보호층 형성을 통해 내식성이 개선될 가능성이 있어 자동차 및 일부 산업용 부품에서의 잠재적 활용성을 평가하기 위해 포함하였다. 특히, 건식 조건에서는 ZnO 및 Al_2O_3 보호층이 안정적으로 유지될 가능성을 고려하여, Cl_2 환경에서의 성능을 평가할 필요가 있다.

본 연구의 목표는 이들 합금의 Cl_2 가스 환경에서의 부식 특성을 정량적으로 평가하고, 부식 생성물 형성과 보호층 형성 메커니즘을 분석하여 내식성이 우수한 소재를 선정하는 것이다. 이를 통해, 건식 및 습식 Cl_2 환경에서의 부식 특성을 비교하고, 수분 유무에 따른 소재의 내구성 변화를 연구하며, 장기간 사용할 수 있는 내식성 소재를 평가하고 산업 적용 가능성을 검토하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 Cu, Zn-Al-Cu, Co-Ni-Cr, Co-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni 다섯 가지 소재를 대상으로 Cl_2 99.9% 가스 환경

에서의 부식 거동을 비교 분석하였다. 해당 소재의 조성을 Table 1에 나타내었으며, 부식 실험 전 표면을 연마하여 균일한 초기 상태를 유지하였다. 표면 거칠기를 최소화하기 위해 600# 사포까지 연마한 후, 초음파 세척을 수행하여 이물질을 제거하였다. 세척에는 에탄올과 증류수를 사용하였으며, 이후 60 °C의 진공 건조기에서 건조하여 외부 오염을 방지한 상태로 실험 전까지 밀폐된 환경에서 보관하였다. Cl_2 노출 실험 직전 무게를 측정하여 진행하였다.

Cl_2 가스 환경에서의 부식 영향을 평가하기 위하여, 실험 조건을 수분이 존재하는 조건과 수분이 없는 조건으로 구분하였다. 수분이 존재하는 조건에서는 샘플 장입 시 습도센서를 활용하여 내부 습도 확인 시 상대 습도 26%로 이때의 챔버 내부 온도 25 °C에서 Cl_2 가스를 주입 하였다. 반면, 수분이 없는 조건에서는 시편을 챔버에 장입한 후 진공 펌프와 초고순도 질소(6N)로 퍼징하

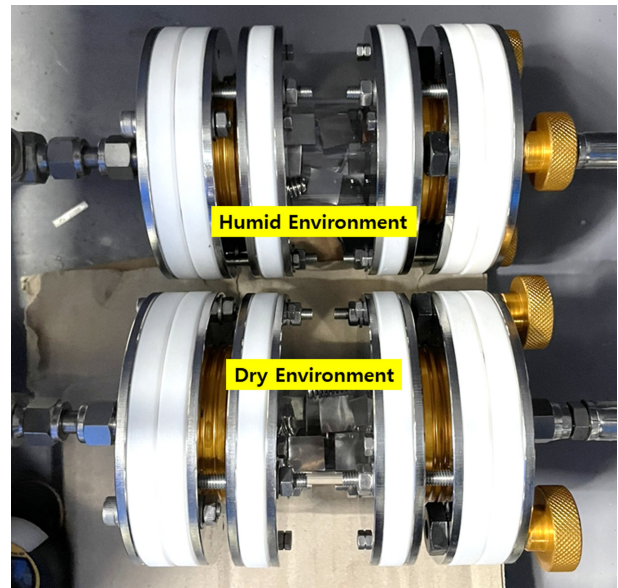


Fig. 1. Corrosion test chambers under humid and dry environments

Table 1. Chemical Composition of Selected Alloys (unit : wt%)

Sample name \ Element	Cu	Zn	Al	Co	Ni	Cr	Fe	Mo	etc.
Cu	99.9								0.1
Zn-Al-Cu	2.25	70.75	27						-
Co-Ni-Cr				33.68	30.4	21	2.1	10	2.82
Co-Cr-Ni				45.85	18	20	4.5	7	4.65
Fe-Cr-Ni					4.3	16.5	75.16	2.75	1.29

였으며, 수분분석기를 이용하여 20 ppb 이하의 수분 환경을 확인한 뒤, Cl_2 가스를 30분간 주입하였다. 이를 통해 동일한 Cl_2 농도에서 수분이 부식에 미치는 영향을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다.

각 실험 조건에서 시편을 밀폐형 부식 챔버(Fig. 1)에 장입한 후 Cl_2 가스를 주입하여 부식 실험을 진행하였다. 챔버 내부의 가스가 존재하도록 밸브를 통해 시스템을 닫힌계로 설정하여 외부와의 접촉을 차단하였다. 실험은 14일 동안 유지되었으며, 이 기간 동안 시편의 부식 거동을 관찰하고, 실험 종료 후 시편을 회수하여 부식 상태를 분석하였다.

실험 종료 후 부식 특성을 평가하기 위해 무게 변화 분석과 SEM-EDS 분석을 수행하였다. 무게 변화 분석에서는 정밀 저울(OHAUS, Adventurer)을 이용하여 실험 후 시편의 무게를 측정하여 실험 전 무게와 변화를 측정하고, 이를 통해 부식에 따른 질량 증가율 및 감소율을 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 각 소재의 수분 유무 조건이 부식에 미치는 영향을 분석하였다. SEM-EDS (Tescan, Mira3) 분석을 통해 부식 생성물의 형태 및 화학적 조성을 분석하였다. 이를 통해 각 소재에서 형성된 부식 생성물의 차이를 확인하고, 소재별 부식 반응을 관찰하였다.

3. 연구결과

본 연구에서는 Cl_2 가스 환경에서 수분 유무에 따른 다섯 가지 소재의 부식 거동을 비교하기 위해 무게 변화 분석과 SEM-EDS 분석을 수행하였다. 각 소재는 수분 조건과 건조 조건에서 서로 다른 부식 특성을 보였으며, 이에 대한 무게 변화에 대한 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었고, 특히 수분이 존재하는 경우 무게 증가

량이 높은 것으로 대부분 나타났다.

무게 변화 분석 결과, Co-Ni-Cr, Co-Cr-Ni 소재는 적은 무게 변화를 보이며 Cl_2 환경에서 우수한 부식 저항성을 나타내는 것으로 확인되었다. 반면, Zn-Al-Cu 합금은 소폭 증가하는 무게 변화를 보였다. Cu, Fe-Cr-Ni의 경우에도 수분이 존재할 때 부식이 더욱 심해지는 경향을 나타냈으며, 특히 Cu는 Cl_2 와 반응하여 CuCl_2 가 형성되면서 수분 조건하에서는 염화물로 변화한 것으로 관찰되었다. 이에 대한 실험 후 수분 유무 조건 별 샘플의 표면을 Fig. 3에 나타내었다.

실험 후 샘플 표면의 SEM 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 습윤 환경에서 Cu는 CuCl_2 로 변화한 것으로 보이는 형상물이 존재하였다. Zn-Al-Cu 합금과 Fe-Cr-Ni 합금에서는 염화물 형성 후 수분 증발로 인해 균

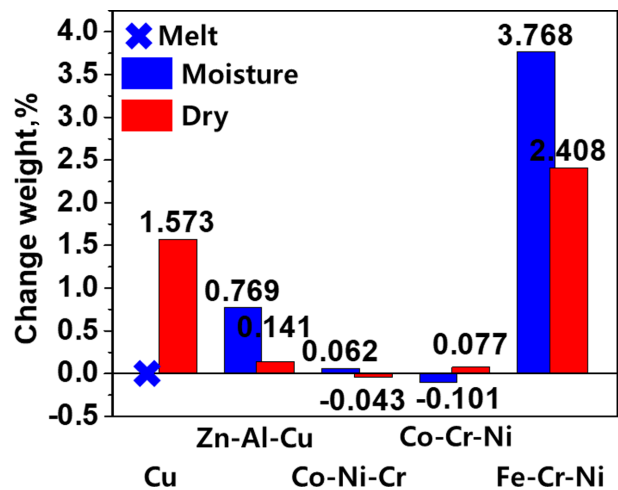


Fig. 2. Comparison of Weight Gain/Loss in Alloys Under Moist and Dry Conditions

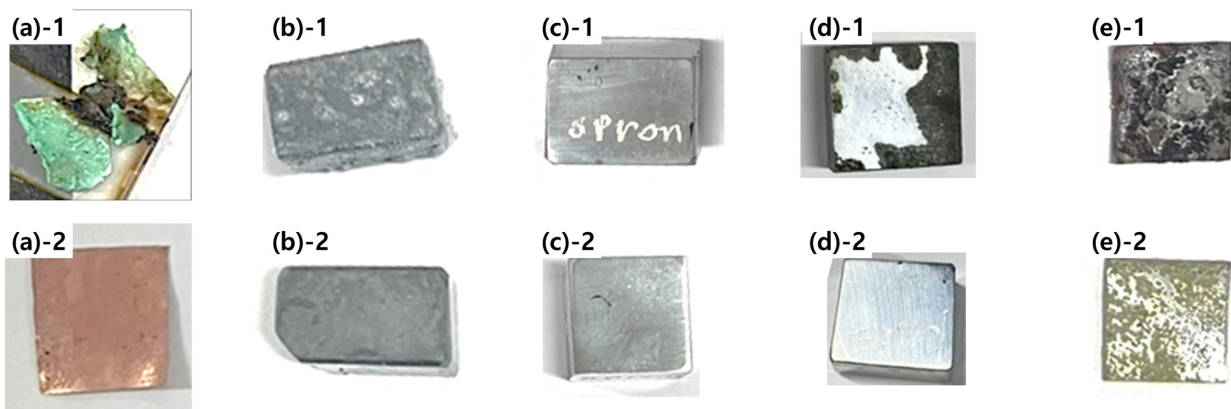


Fig. 3. Surface morphology of various metal samples—(a) Cu, (b) Zn-Al-Cu, (c) Co-Ni-Cr, (d) Co-Cr-Ni, and (e) Fe-Cr-Ni—after exposure to a humid environment (1) and a dry environment (2)

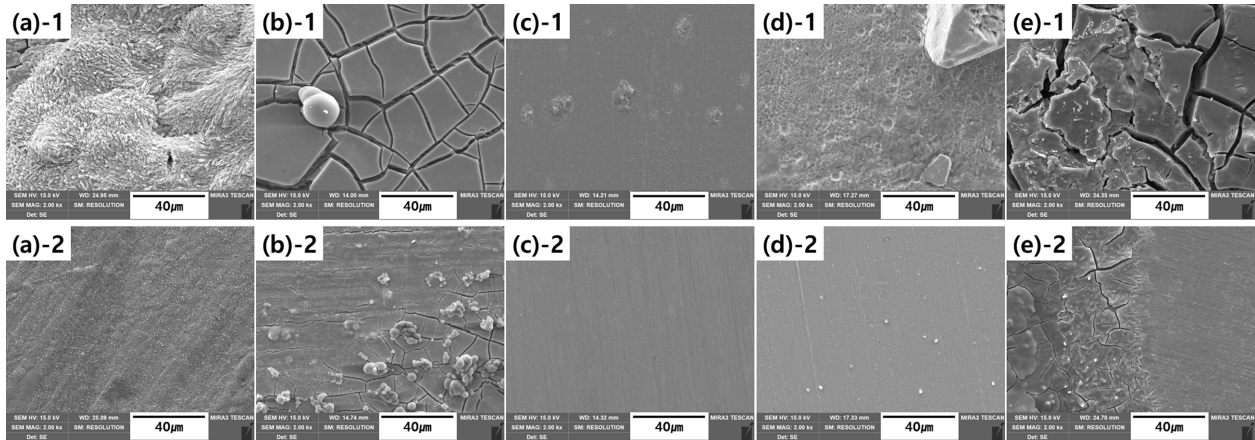


Fig. 4. Surface morphology of various metal samples observed by SEM—(a) Cu, (b) Zn-Al-Cu, (c) Co-Ni-Cr, (d) Co-Cr-Ni, and (e) Fe-Cr-Ni—after exposure to a humid environment (1) and a dry environment (2)

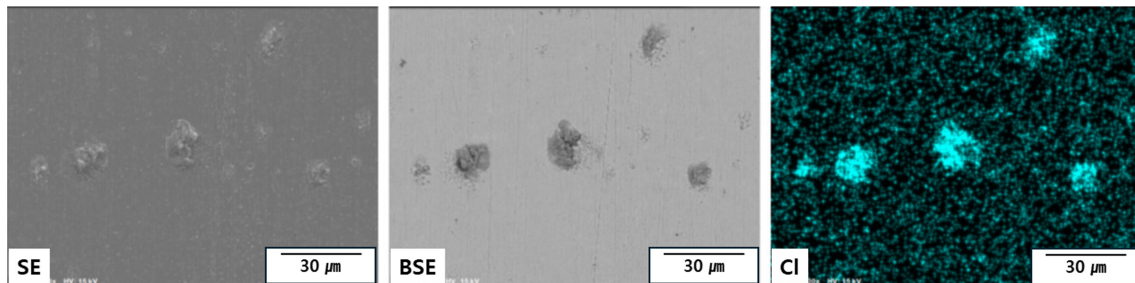


Fig. 5. EDS mapping analysis of Co-Ni-Cr alloy after corrosion under humid conditions (Cl_2)

열이 관찰 되었다. Co-Ni-Cr은 일부 염화물이 표면에 형성되었으나, 실험 전 스크래치가 유지된 상태였다. 해당 일부 염화물은 Fig. 5에 EDS-Mapping 분석 결과를 통해 확인하였다. Co-Cr-Ni 합금은 표면 전체에 부식 생성물이 남아 있었다.

건조 환경에서도 일부 소재에서 균열이 관찰되었으며, 이는 염화물 형성 이후 성장 과정에서 발생한 내부 응력 때문으로 사료된다. Cu는 초기 스크래치 표면에서의 염화물이 형성 된 것으로 보이나, 수분이 없음에 따라 스크래치 방향으로의 염화물이 일부 성장한 것으로 보인다. Zn-Al-Cu 합금과 Fe-Cr-Ni 합금에서는 염화물이 형성된 후 일부 균열이 발생하였으며, Co-Ni-Cr과 Co-Cr-Ni 합금은 상대적으로 표면 변형이 적었다. 전체적으로 Co-Ni-Cr이 가장 안정적인 표면 상태를 유지하며 우수한 내식성을 보인다.

EDS 분석 결과 습윤 환경에서 Cu 및 Zn-Al-Cu 합금에서 각 40.1 wt%, 28.18 wt%로 높은 Cl 함량이 검출되었으며, Fe-Cr-Ni에서도 Cl이 8.87 wt%로 확인되었다. Zn-Al-Cu 합금의 경우 산소(O) 함량 또한 22.16 wt%로 높아, 염화물이 포함된 수화물로 판단된다.

건조 환경에서는 습윤 조건 대비 Zn-Al-Cu 및 Fe-Cr-

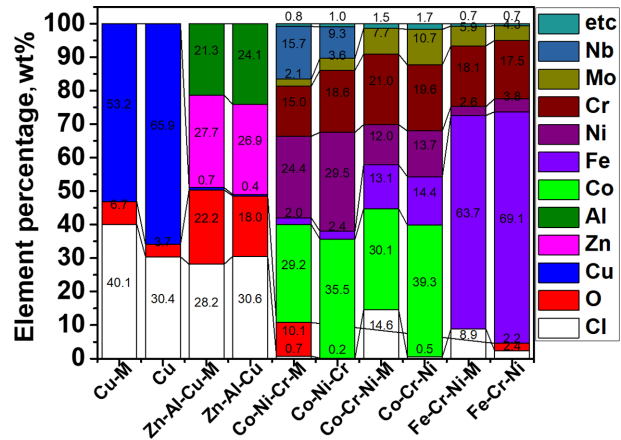


Fig. 6. EDS analysis results of sample surfaces after testing under moisture (-M) and dry conditions

Ni 합금에서 각 30.55 wt%, 2.41 wt%로 Cl 함량이 감소했으나, 높은 Cl 성분 분석 결과로 표면 잔류하는 것으로 관찰되었다. Co-Ni-Cr 및 Co-Cr-Ni 계열 합금에서는 상대적으로 낮은 Cl 농도로 분석되었다. 이러한 EDS 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

이러한 결과를 종합하면, Co-Ni-Cr이 Cl_2 가스 환경에

서 가장 우수한 내식성을 보였으며, Zn-Al-Cu 합금과 Cu는 상대적으로 부식에 취약한 것으로 나타났다. 또한, 모든 소재에서 수분이 존재할 때 부식이 가속화되는 경향을 나타냈다.

4. 고찰

본 연구에서는 Cl_2 가스 환경에서 다섯 가지 소재의 부식 거동을 분석하였으며, 특히 수분이 존재하는 경우와 없는 경우의 부식 메커니즘 차이를 확인하였다. 실험 결과, 수분이 존재할 경우 대부분의 소재에서 부식 속도가 현저하게 증가하는 경향을 보였으며, 이는 Cl^- 이온이 표면에서의 반응성을 촉진하여 부식이 가속화되었기 때문으로 해석된다. 특히, Zn-Al-Cu 합금과 Cu는 부식 생성물이 빠르게 형성되었으나, 표면 보호층 역할을 하지 못하고 쉽게 탈락하면서 부식이 지속적으로 진행되었다. Co-Ni-Cr 및 Co-Cr-Ni 합금의 경우, Co-Cr이 전율고용체 상으로, 표면에 Cr 보호층이 형성되며, 이로 인해 장기간의 부식 저항성이 확보된다 [5]. 이러한 보호층은 외부 환경으로부터 금속 내부를 효과적으로 보호하며 부식 진행을 지연시키는 역할을 한다. 또한 Kim *et al.* [6]의 연구에 따르면, Ni - Cr 합금과 비교 하였을 때, Co-Cr 계열 합금의 내부식성이 약 3배 우수한 것으로 보고되었다. 이는 Co의 역할이 Cr 보호층 형성에 유리하게 작용함을 의미하며, 특정 환경에서 Co-Cr 계열 합금이 더욱 우수한 내식 특성을 가질 수 있음을 나타낸다.

Cu 샘플은 Cl_2 와 반응하여 CuCl_2 를 형성하였으며, 특히 습윤 환경에서는 광범위한 부식이 진행되어 수화물 형태로 변화하였다. 이는 Cu가 Cl_2 가스와의 반응성이 높고, CuCl_2 가 수용성이 커서 공기 중의 수분을 흡수하기 때문이다. 습윤 환경에서는 CuCl_2 보호층이 수분과 반응하면서 Cu^{2+} 이온을 용출시키고, Cl^- 이온이 부식을 촉진하는 역할을 한다. 그 결과, Cl^- 이온이 존재하는 환경에서는 CuCl_2 가 지속적으로 용해되며 부식이 가속화된다. 이러한 과정으로 인해 Cu 표면에서는 보호층이 안정적으로 형성되지 못하고 반복적으로 용해 및 재형성되었으며, 이는 부식 생성물이 표면에 축적되지 않고 지속적인 반응으로 인해 무게 손실이 급격히 발생한 주요 원인으로 해석된다 [7-9].

Zn-Al-Cu 합금에서는 EDS 분석 결과, Cl 농도가 상대적으로 높았고, 표면의 염화물이 형성 되는 현상이 관찰 되었음에도 불구하고 무게 변화는 크지 않았다. 건조 환경에서는 실험 전 전처리 후 Zn 및 Al 표면에 각각 ZnO 및 Al_2O_3 보호층이 빠르게 형성되며, 이는 Cl_2 가스와의 직접적인 반응을 억제하는 역할을 한다 [10].

이러한 산화 보호층은 금속 표면에서의 추가적인 화학적 반응을 방해하며, Cl_2 가스와의 상호작용을 제한하는 효과를 가진다. 따라서 Cl_2 가스는 금속 표면에서 직접 반응하진다는 물리적으로 흡착된 상태로 존재하게 되며, 이러한 현상이 실험 결과에 영향을 미친 것으로 판단된다. 문헌에서도 유사한 조건에서 Zn 및 Al 산화 보호층이 Cl_2 가스의 반응성을 저하시킨다는 보고가 있으며, 이는 금속의 초기 산화 상태가 부식 및 가스 반응성에 미치는 영향을 시사한다 [10]. 반면 수분이 있는 환경에서도 표면 산화층에 존재하는 ZnO 및 Al_2O_3 는 $\text{ZnAl}_2(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 를 형성하여 내부식성을 향상 시킨다는 연구가 보고된바 있다 [11]. 따라서 수분 유무에 따라 소재가 보호되는 메커니즘은 다르나, ZnO 및 Al_2O_3 보호층이 존재하면, Cl_2 가스와 직접적인 접촉이 제한되며, 표면에 Cl_2 가 축적되어 염화물로의 일부 변화가 발생하였다.

Fe-Cr-Ni 합금은 습윤 환경에서 가장 높은 무게 증가를 보였으며, 이는 보호층이 불안정해지면서 부식 생성물이 축적되었기 때문으로 해석된다. 일반적으로 Cr이 포함된 합금은 Cr_2O_3 보호층을 형성하여 내식성을 가지지만, 고농도 Cl_2 환경에서는 Cr_2O_3 보호층이 Cl_2 와 직접 반응하여 CrCl_3 로 변환되어 부식을 가속화 하는 것으로 사료된다. 이에 대해 M. Metikos가 연구한 바로는 고온에서, Cl의 가스가 Cr_2O_3 의 보호층과 반응하여 CrCl_3 로 변환 한다고 하였으며, 또한 소재에 Fe가 포함되어 있음에 따라 CrCl_3 에서 FeCl_3 에 생성 엔탈피가 더 낮음에 따라 부식이 가속화 되는 현상이 발생하였다고 보고되었다 [12]. 이에 수분이 존재하는 환경에서는 더 빠른 부식이 발생하여 더 많은 무게 증가와 염화물 형성이 나타났으며, 건조 환경에서도 수분이 없더라도 Cr의 염화물 형성과 동시에 산소가 공급되는 상황으로 부식이 발생하는 결과를 보여주었다.

마지막으로 Co에 Cr이 포함되어 있는 소재의 경우의 Cr 보호층은 염화물로 형성될 수 있으나, 일반적인 전기화학적 부식경향에서 Co의 내부식성의 영향을 받아 가장 우수한 내부식성을 나타내었다. Cl_2 가스 환경에서 부식 거동은 소재의 조성과 보호층 형성 여부에 크게 영향을 받으며, 수분이 부식 속도를 크게 증가시키는 주요 요인으로 작용한다. Co-Ni-Cr계 소재는 Cr 보호층 형성과 내부식성이 우수한 Co 소재의 안정성을 통해 내식성이 우수한 반면, Cu 및 Fe-Cr-Ni 소재는 보호층이 효과적으로 형성되지 못하고 지속적인 부식이 진행되는 문제점을 보였다. 따라서, 고 내식성이 필요한 항공 의료 소재로써 Co-Ni-Cr과 같은 보호층이 형성되는 합금이 적합할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 Cl_2 가스 환경에서 다섯 가지 소재(Cu, Zn-Al-Cu, Co-Ni-Cr, Co-Cr-Ni, Fe-Cr-Ni)의 부식 거동을 비교 분석하였다. 실험 결과, Co-Ni-Cr 및 Co-Cr-Ni 합금이 가장 우수한 내식성을 보였으며, Fe-Cr-Ni 및 Cu는 보호층이 유지되지 못하고 급격한 부식이 진행되었다. Zn-Al-Cu 합금은 Cl_2 가스와 반응하여 표면 염화물이 형성되었으나, 산화 보호층 형성 속도와 염화물 형성 속도의 균형으로 인해 무게 변화가 상대적으로 적었다. 습윤 환경에서는 Cl^- 이온이 부식 반응을 촉진하여 모든 소재에서 부식 속도가 증가하는 경향을 보였다.

Co-Ni-Cr 및 Co-Cr-Ni 합금은 Cl_2 가스 환경에서도 Co와 Cr의 상호작용으로 인해 Cr_2O_3 보호층이 안정적으로 유지되며, 내부식성이 우수함을 확인하였다. 이로 인해 항공 및 의료 산업에 주로 적용되고 있는 이러한 소재는, 화학 공정이나 고부식성 환경에서도 장비와 부품 소재로의 활용 가능성을 제시한다. Fe-Cr-Ni 합금은 Cr_2O_3 가 Cl_2 와 반응하여 CrCl_3 로 변환되면서 보호 효과를 상실하였으며, Cu와 Zn-Al-Cu 합금은 상대적으로 낮은 내식성을 보여 추가적인 개선이 필요하다. 따라서, Co 기반 합금은 다양한 부식성 환경에서 적용 가능한 고성능 내식성 소재로 적용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 기술혁신사업 (No. 20017396) 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Y.-N. Chang and F.-I. Wei, High-temperature chlorine corrosion of metals and alloys, *Journal of Materials Science*, **26**, 3693 (1991). Doi: <https://doi.org/10.1007/BF01184958>
2. J. Yao, H. H. Funke, and M. W. Raynor, *Proc. SEMI-CON West 2004*, Measurement and Control of Trace Moisture in Corrosive Gases, California, U.S.A. (2004).
3. T. Narushima, K. Ueda, and Alfirano, *Co-Cr Alloys as Effective Metallic Biomaterials*, in *Advances in Metallic Biomaterials*, pp. 157 - 178, Springer, Berlin, Heidelberg (2015). Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-46836-4_7
4. S. Y. Jang, Ph.D. Thesis, p. 9, KAIST, Daejeon (2005).
5. C. T. Sims, N. S. Stoloff, and W. C. Hagel, *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*, p. 145, John Wiley & Sons, New York (1987).
6. K. Kim, B. Choi, D. Oh, and B.-S. Choi, Corrosion Characteristics of Ni-Cr and Co-Cr Alloy Used as a Dental Prosthesis and Its Adhesion to Porcelain, *Corrosion Science and Technology*, **15**, 141 (2016). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2016.15.3.141>
7. S. H. Suh, Y. Suh, J. Lee, and H. Kwon, Inhibition of Pitting Corrosion Failure of Copper Tubes in Wet Sprinkler Systems, *Corrosion Science and Technology*, **19**, 89 (2020). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2020.19.2.89>
8. S.-K. Min, K.-T. Kim, and W.-S. Hwang, Improvement of Corrosion Resistance for Copper Tube by Electrochemical Passivation, *Corrosion Science and Technology*, **10**, 125 (2011). https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00100400125
9. S.-K. Min, S.-C. Na, and W.-S. Hwang, The Influence of pH on Corrosion Behavior of Copper Tubes in Tap Water, *Corrosion Science and Technology*, **8**, 232 (2009). https://www.j-cst.org/opensource/pdfs/web/pdf_viewer.htm?code=C00080600232
10. G. De Micco, F. Alvarez, A. Bohé, and D. Pasquevich, Chlorination Applied to the Separation of Metals, *Proc. 2006 TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*, **5**, 403, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), (2006).
11. J.-W. Lee and S. J. Kim, Effects of Cooling Rates of Coating Layer on Microstructures and Corrosion Behaviors of Zn-Al-Mg Alloy Coated Steel Sheets, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 221 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.3.221>
12. A. Zahs, M. Spiegel, and H. J. Grabke, Chloridation and oxidation of iron, chromium, nickel and their alloys in chloridizing and oxidizing atmospheres at 400–700 °C, *Corrosion Science*, **42**, 1093 (2000). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00142-0)