

염화철 에칭 용액 재생을 위한 산화공정에 대한 연구

§김대원 · 박일정 · 김건홍 · 이상우* · 최희락** · 정항철

고등기술연구원 신소재공정센터, *(주)케이엠씨, **부경대학교 재료공학과

A Study on the Oxidation Process for Regeneration of Ferric Chloride Etching Solution

§Dae-Weon Kim, Il-Jeong Park, Geon-Hong Kim, Sang-Woo Lee*,
Hee-Lack Choi** and Hang-Chul Jung

Advanced Materials and Processing Center, Institute for Advanced Engineering(LAE), Yongin 17180, Korea

*KMC, Gumi 39414, Korea

**Department of Materials Science & Engineering, Pukyong University, Busan 48547, Korea

요 약

FeCl₃ 용액은 금속의 에칭용액으로 사용되며, 사용 후 발생하는 FeCl₃ 에칭폐액은 환경적, 경제적으로 문제를 지니기 때문에 에칭액을 재사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 FeCl₂ 용액에 HCl을 첨가 한 후, 산화제로 H₂O₂를 첨가하여 용액 내 Fe²⁺를 산화시켰으며, 산화과정에서 산화-환원전위(ORP)와 산화율 간의 관계를 조사하였다. ORP는 HCl과 H₂O₂의 농도가 증가함에 따라 증가하였으며, 산화가 진행되면서 점차 감소하여 Nernst 식과 일치하는 결과를 보였다. 또한 충분한 양의 HCl과 H₂O₂를 첨가하였을 경우, 약 99% 이상 산화가 이루어짐을 알 수 있었다.

주제어 : 염화철, 산화, 재생, 에칭액, 산화-환원전위

Abstract

The FeCl₃ solution has been used as an etchant for etching of metal. It is necessary to reuse the etching solution because waste FeCl₃ etchant generated after use has provided environmental and economic problems. In this study, HCl was mixed with the FeCl₂ solution and then H₂O₂ was added into the mixed solution to oxidize the Fe²⁺. During the oxidation process, oxidation-reduction potential (ORP) was measured and the relationship between ORP and oxidation ratio was investigated. As a result, this study found that the ORP was increased with increasing the concentration of HCl and H₂O₂, while the ORP is decreased with oxidation progress. Such a behavior was in good agreement with Nernst's equation. Also, the oxidation efficiency reached about 99% when a sufficient amount of HCl and H₂O₂ were added.

Key words : ferric chloride, oxidation process, regeneration, etching solution, oxidation reduction potential

· Received : October 19, 2016 · 1st Revised : November 29, 2016 · 2nd Revised : February 16, 2017 · Accepted : February 24, 2017

§ Corresponding Author : Dae-Weon Kim (E-mail : mdsimul@naver.com)

Advanced Material & Processing Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51 beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-shi, Gyeonggi-do, 17180, Korea

© The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

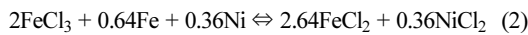
1. 서 론

염화제이철(ferric chloride, FeCl₃) 농축 수용액은 강한 산화력을 나타내기 때문에 Invar (Ni-Fe alloy)가 주로 사용되는 OLED (organic light emitting diode) shadow mask와 PCB (printed circuit board), lead frame 등 정밀 전자 부품 제조 시 철, 구리, 알루미늄, 니켈 등을 포함한 다양한 금속을 식각하는데 필요한 용액으로 널리 사용되고 있다.

예를 들면, shadow mask의 식각공정은 염화철의 사용 정도에 따라 아래 반응식과 같이 일정 시간이 지나면 에칭성을 나타내는 Fe³⁺이 Fe²⁺로 환원되기 때문에 에칭 용액의 품질이 떨어진다. 일반적으로 염화제이철 용액에 의한 금속의 식각 반응¹⁾은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.



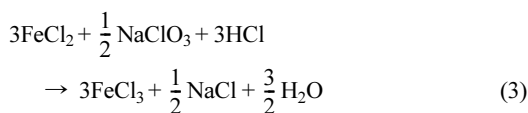
그러나, shadow mask의 재료인 Invar합금은 64 mol%의 Fe와 36 mol%의 Ni로 이루어져 있으므로 염화제이철 용액에 의한 Invar합금의 식각 반응²⁾은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.



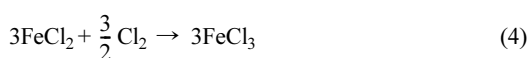
상기와 같이 에칭이 진행될수록 Fe³⁺가 Fe²⁺로 환원되어 에칭용액의 에칭 능력이 저하되고 금속에칭 시 발생하는 여러 가지 중금속 이온들로 인하여 더 이상 사용하지 못하고 염화철 에칭용액은 폐액으로 배출되며, 이는 환경적인 문제뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 바람직하지 않다. 따라서 염화철 폐액의 재생 및 재사용은 반드시 필요한 상황이다.

염화철 폐액의 재사용을 위해서 우선 산화력이 저하된 Fe²⁺를 Fe³⁺로 산화시켜야 하는데 지금까지 제안된 방법은 다음과 같으며, 그 반응식을 함께 나타내었다^{3,4)}.

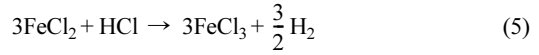
◆ NaClO₃ 및 HCl를 이용하여 재생하는 방법



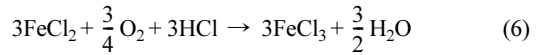
◆ 염소가스를 주입하여 재생하는 방법



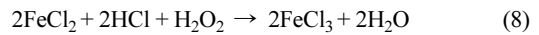
◆ 전기분해를 통해 산화시켜 재생하는 방법



◆ O₂ 및 O₃를 이용하여 재생하는 방법



◆ H₂O₂를 첨가하여 재생하는 방법⁶⁾



상기 제시된 염화철 폐액의 산화방법은 유해성과 같은 환경적 문제 및 효율성과 같은 경제성 문제 등이 발생하기 때문에 재생 공정 적용 시, 최적화된 방법을 통하여 공정 운영을 할 필요가 있다.

본 연구에서는 금속의 식각 공정을 위하여 사용되는 염화철 에칭 용액에 대하여 에칭이 진행됨에 따라 에칭력의 저하로 인하여 폐기되고 있는 에칭 용액을 재생하는 공정의 하나인 산화공정에 대하여 가장 효과적인 공정을 적용하기 위하여 상기 제시된 방법들 중 우선 산화제로서 사용된 과산화수소 및 염산에 의한 산화공정에 대하여 살펴보았다.

2. 실험

본 연구에서는 사용된 시료는 염화철 에칭 용액을 통하여 니켈계 합금에 대한 에칭공정을 통하여 배출된 용액을 대상으로 하였으며, 이에 대한 기본적인 성분은 Table 1에 나타내었다. 또한 염화철 에칭 용액의 재생을 위한 산화 실험은 FeCl₃·6H₂O (DAEJUNG, 98%) 및 FeCl₂·4H₂O (DAEJUNG, 99%)을 이용하였으며, 산화를 위하여 HCl (DAEJUNG, 35%) 및 H₂O₂ (DAEJUNG, 30%)를 이용하여 실험을 실시하였다. FeCl₃과 FeCl₂의 양에 따른 비중, pH, Fe 이온과 표준 전극과의 전위차를 측정 한 산화환원전위(Oxidation-Reduction Potential, ORP)의 변화를 분석하기 위하여 비중계와 pH/ORP meter (pH-240L, iSTEK)를 이용하여 측정함으로써 그 변화를 살펴보았다. 산화 실험은 FeCl₂ 용액 100 ml를 교반하면서 HCl과 H₂O₂의 당량을 조절하여 첨가하였으며 용액의 pH 및 ORP를 pH/ORP meter를 이용하여 측정하였으며 ORP가 일정하게

Table 1. Component of the iron chloride waste solution

Analysis item	Unit	Content	Test method
FeCl ₃	%	26.11	KS M 1118
FeCl ₂	%	10.94	KS M 1118
Specific gravity	S.G	1.465	KS M 0004
Ni	%	2.61	AAS

유지될 때까지 반응을 진행하였다.

그리고, 염화철 폐용액의 Fe²⁺이 Fe³⁺로 산화되어 재생되었는지 확인하기 위하여 염화철용액 함량 측정법(KS M 1118)을 이용하여 Fe²⁺ 및 Fe³⁺ 함량을 분석함으로써 산화정도를 살펴보았다. Fe³⁺의 함량을 분석하기 위해 약 1g의 시료를 분취하여 50 ml의 증류수로 희석시킨 후, KI (DAEJUNG, 99.5%)를 3g과 HCl (DAEJUNG, 35%) 3 ml를 첨가하여 2시간 동안 교반하였다. 제조한 시료 용액이 투명해질 때까지 Na₂S₂O₃ (DUKSAN, 0.1 M) 용액을 첨가하고, 다음 식에 따라 Fe³⁺ 함량을 계산하였다.

$$A = \frac{0.1622 \times C \times 100}{S} \quad (9)$$

여기서, A는 Fe³⁺의 함유량(%), C는 0.1 M Na₂S₂O₃ 용액 소비량(ml), S는 시료량(g)을 나타낸다. Fe²⁺의 함량 분석을 위해 약 2g의 시료를 분취하여 40 ml의 증류수로 희석시킨 후, 10% 인산용액을 4 ml 첨가하여 교반하였다. 10% 인산용액은 MnSO₄·5H₂O (DUKSAN, 99%) 90g을 증류수 약 200 ml에 용해하고 H₃PO₄ (DAEJUNG, 85%) 175 ml를 첨가하여 1000 ml로 희석하여 제조하였다. 제조한 시료 용액이 연분홍색을 띠게 될 때까지 KMnO₄ (DUKSAN, 0.1 M) 용액을 첨가하였고, 다음 식에 따라 Fe²⁺ 함량을 계산하였다.

$$B = \frac{1.268 \times D}{S} \quad (10)$$

여기서, B는 Fe²⁺의 함유량(%), D는 0.1 M KMnO₄ 용액 소비량(ml), S는 시료량(g)을 나타낸다.

에칭력을 상실한 에칭구액은 산화 공정을 거쳐 [Fe²⁺]에서 [Fe³⁺]로 변화하게 되며 용액 내 [Fe²⁺]와 [Fe³⁺]의 농도 변화에 따른 Nernst식은 하기와 같으며, 재생이 진행되면서 [Fe³⁺]의 농도가 증가하므로 ORP는 증가하게 된다^{4,5)}.



$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} = 2.303 \frac{RT}{nF} \log \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \quad (12)$$

여기서, E는 ORP (V), R은 기체상수(8.31 J/mol K), T는 절대온도(K), n은 반응에 참여한 전자 수, F는 Faraday 상수(96485 C/mol), [Fe²⁺]와 [Fe³⁺]는 Fe²⁺ 및 Fe³⁺의 농도이다.

3. 실험결과 및 고찰

우선 시약급 염화제1철 및 염화제2철의 농도에 따른 기본적인 물성인 비중, pH 및 ORP를 측정하였으며, 이에 대한 결과를 Table 2에 정리하였다. Table 2에 나타난 결과에 의하면 염화제1철 및 염화제2철의 농도가 증가함에 따라 용액의 비중과 ORP는 증가하였으며 pH는 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 염화철 농도 및 Fe³⁺/Fe²⁺가 비중, pH, ORP에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

제사용하고자 하는 염화철 구액은 KS M 1118에 따른 측정법에 의하면 Fe³⁺/Fe²⁺=2.4로서 식각공정에 사용되기에는 에칭능력을 상실한 상태로, 니켈 함유 금속의 식각으로 인하여 니켈 함량이 약 2.6% 함유된 용액을 원료로 사용하였으며, 이때의 용액의 비중은 1.465였다. 염화철 에칭 구액과 시약급 염화제2철 농도에 따른 비중변화를 분석을 하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 염화철 에칭구액이 비중이 시약급 염화철

Table 2. Summary of characteristics for the FeCl₃ and FeCl₂ solution

	Amount of FeCl ₃ in solution (%)						Amount of FeCl ₂ in solution (%)					
	2.8	13.9	18.6	22.5	32.7	40.0	2.2	11.5	15.8	19.5	29.9	38.0
S.G	1.020	1.122	1.170	1.206	1.324	1.420	1.019	1.104	1.154	1.194	1.316	1.438
ORP (mV)	466	513	528	539	574	595	421	454	464	471	493	503
pH	1.48	0.60	0.33	0.12	-0.47	-0.91	2.32	1.69	1.51	1.38	0.99	0.76

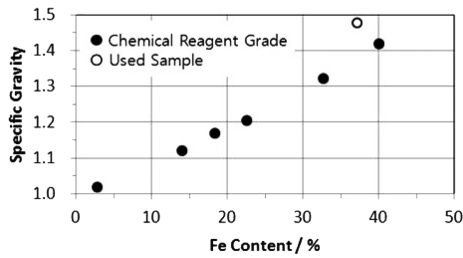


Fig. 1. The relationship of specific gravity and Fe content for chemical reagent grade and used sample.

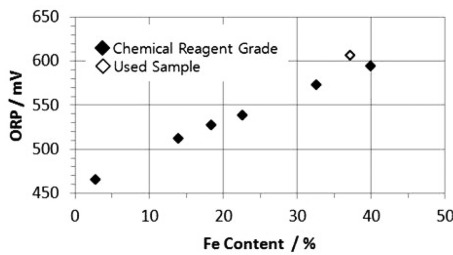
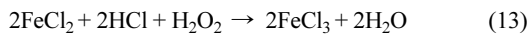


Fig. 2. The relationship of oxidation-reduction potential (ORP) and Fe content for chemical reagent grade and used sample.

용액보다 높게 측정되었으며, 이는 불순물로 존재하는 니켈의 비중이 높기 때문이라고 판단된다.

또한, 염화철 에칭 구액과 시약급 염화제2철 농도에 따른 ORP 차이를 Fig. 2에 나타내었으며, 그 결과를 살펴보면 불순물로서 존재하는 니켈을 함유한 구액은 pH가 더 낮기 때문에 증가한 것으로 판단된다.

산화제 첨가에 의한 영향을 살펴보기 위하여 염화철 에칭 구액 및 시약으로 제조된 약 15.8% FeCl₂가 함유된 용액을 이용하여 실험을 실시하였다. 우선, 산화제 역할을 하는 과산화수소를 이용한 반응식은 다음과 같이 표현할 수 있다.



이 반응식에 대한 Nernst식을 적용하면 다음과 같다.

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Fe}^{3+}]^2}{[\text{Fe}^{2+}][\text{H}^+]^2[\text{H}_2\text{O}_2]} \quad (14)$$

$$E = 0.989 - 0.0592 \log \frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} - 0.0592 \text{pH} + 0.0296 \log [\text{H}_2\text{O}_2] \quad (15)$$

과산화수소에 의한 Fe²⁺의 산화가 진행되는 경우, 상기 반응식 (15)에 따르면 ORP의 변화는 [Fe³⁺]/[Fe²⁺]의 농도 비 뿐만 아니라 염산에 의한 pH 및 [H₂O₂]의 농도도 산화반응에 관여함을 알 수 있다. ORP는 [Fe³⁺]/[Fe²⁺]의 농도 비가 증가함에 따라 감소하게 된다. 이러한 결과는 [Fe³⁺] 및 [Fe²⁺]의 반응에 의한 Nernst식 (11)에서 언급한 [Fe³⁺]의 농도가 증가함에 따라 ORP가 증가하는 이론과 반대로 해석되어지며⁴⁾, 이는 염산과 과산화수소가 반응에 관여한 산화반응에 의한 것이라 판단된다. 그리고 식 (15)에 의하면, 염산 첨가에 의해 pH가 감소함에 따라 ORP는 증가하게 되며, 또한 Fe²⁺의 산화반응을 위하여 과산화수소 첨가를 하게 되면 [H₂O₂]의 농도증가로 인하여 ORP가 증가하게 됨을 알 수 있다. H₂O₂는 강력한 산화제로써 Fe²⁺와 반응하여 Fe³⁺과 수산화 라디칼을 형성하며, 수산화 라디칼은 강한 산화력을 바탕으로 Fe²⁺를 연쇄적으로 산화시키는 펜톤 반응을 일으켜 결국에는 Fe³⁺이온이 생성된다⁷⁾.

실질적인 과산화수소에 의한 Fe²⁺의 산화반응을 확인하기 위하여 시약급 FeCl₂·4H₂O 분말을 이용하여 약 15.8%의 FeCl₂의 용액을 제조하여 산화 실험하였다. Fe²⁺의 용액의 pH는 1.59였으며, ORP는 약 453 mV였다. Fe²⁺의 산화반응과 수산화물 형태의 침전을 최소화하기 위하여 2 ml씩 염산을 첨가하여 pH가 -1 ~ -2 범위 위 오도록 첨가하였으며 이에 따른 ORP 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

염산이 첨가됨에 따라 pH는 1.59에서 -1.09까지 변하였으며, 이에 따른 ORP는 453 mV에서 593 mV까지 약 30% 정도 상승하였으며, 이는 과산화수소에 의한 산화반응식의 Nernst식 (식 13)에서 보는 바와 같이 pH가 감소함에 따라 ORP는 증가하는 경향과 일치함을

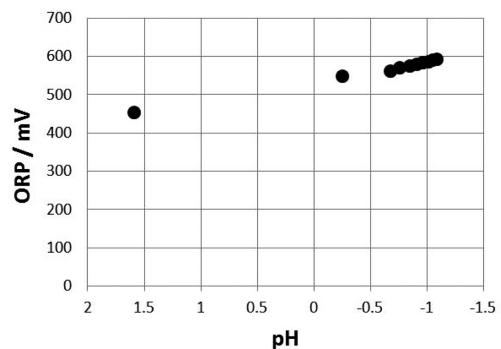


Fig. 3. The relationship of oxidation-reduction potential (ORP) and pH with the addition of hydrochloric acid.

Table 3. The oxidation-reduction potential (ORP) and pH values according to the oxidation-reduction reaction with HCl and H₂O₂

	pH	ORP (mV)	The ratio of ORP variation (%)
Initial Solution State	1.45	464	-
Addition of HCl	-0.95	591	27.4
Addition of H ₂ O ₂	-1.44	617	4.4
Final Solution State	-0.81	584	5.3

확인할 수 있다.

또한, 산화제로 과산화수소를 사용하여 Fe²⁺의 산화 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Table 3 및 Fig. 4에 나타내었다. [Fe²⁺]의 산화를 위하여 반응식을 살펴보면 염산이 필요하기 때문에 먼저 필요한 염산 양의 1.4배를 첨가하였으며, 그 후에 과산화수소를 필요한 양 대비 약 1.2배를 첨가하여 산화실험을 실시하였다. Fig. 4의 결과를 살펴보면, Fig. 3에서 2 ml씩 염산 첨가에 의한 ORP의 증가율이 약 30%와 비교하여 일시에 첨가하였을 경우에도 ORP의 증가율이 약 27% 정도로 비슷하였으며, 그 후 과산화수소를 첨가하였을 경우에는 ORP (617 mV)가 약 4.4% 증가하였으며, 이는 과산화수소에 의한 산화반응식의 Nernst식에서 보는 바와 같이 [H₂O₂]의 농도 증가에 따른 ORP가 증가하는 경향과 일치함을 알 수 있다. 그러나 시간에 따라 ORP가 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 [H₂O₂]의 농도가 증가함에 따라 산화가 진행되어 [Fe³⁺]의 농도가 증가함에 따라 ORP가 감소하는 것으로 판단되며, 이는 본 연구에서 진행한 염산 및 과산화수소를 이용한 산화환원 반응에 의한 Nernst식 (식 13)에서 언급한 내용과 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 과산화수소를 첨가 후 약 30분 정도에서 ORP의 변화량이 거의 없었으며, 이때의 ORP (584 mV) 감소량은 약 5.3%였다. 산화환원 반응이 완료된 시점에서의 산화반응의 정도를 분석하기 위하여 염화철용액 함량 측정법(KS M 1118)을 이용하여 Fe²⁺ 함량을 분석한 결과 약 0.06%로 산화를 99% 이상으로 거의 산화가 완료되었음을 알 수 있었다.

최종적으로 산화가 완료된 염화철 용액의 ORP 및 산화반응 전 염화철 용액의 ORP의 값의 비교하여 보면 약 25.8% 정도 증가된 용액으로 변화하였음을 알 수 있었다.

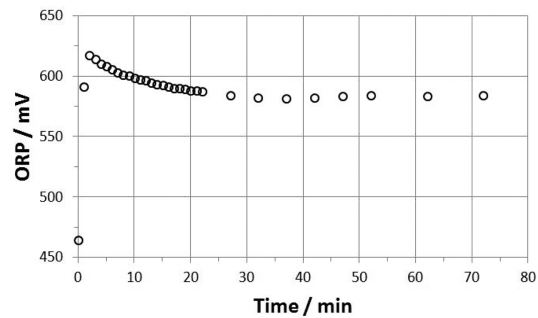


Fig. 4. The relationship of oxidation-reduction potential (ORP) and time with the addition of H₂O₂.

Fig. 2에서 [Fe³⁺]의 함량과 ORP 관계에서 선형회귀식은 $Y(\text{ORP}) = 3.4173 \times (\text{Fe 함량}) + 461.5$ ($R^2 = 0.9941$)에서 Fe 함량 15.8%의 농도에서는 약 516 mV의 ORP 값을 유추할 수 있다. 이는 실제 Fe²⁺의 산화실험에서는 약 584 mV의 ORP값을 나타내어 약 11.6% 정도 차이가 나타남을 알 수 있다. 이는 두 용액 사이의 pH값에 기인한 것이라 판단되며, pH의 값의 차이 약 1.4에 의한 ORP의 변화량 값 약 72 mV를 감안하면 약 5.6% 차이가 있음을 알 수 있었으며, 이는 pH값을 고려하면 거의 유사함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 산화반응에 필요한 과산화수소의 양에 따른 산화율을 나타내었다. 산화반응을 일으키기 위한 염산의 양을 필요한 양보다 소량 및 과량으로 첨가한 후 과산화수소를 2 ml씩 첨가하면서 5분 정도 반응 시간이지난 후 Fe²⁺ 함량을 분석하여 반응 전/후의 Fe²⁺ 함량 변화량으로서 산화율을 나타내었다. Table 4에 실험결과를 정리하여 나타내었다.

약 15.8%의 Fe²⁺의 농도를 가지는 용액에 염산이 당량 대비 1.4배로 과량으로 첨가한 경우, 산화에 필요한

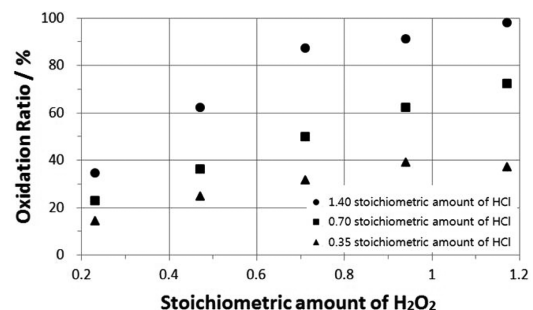


Fig. 5. The relationship of oxidation ratio and the concentration of H₂O₂ according to the addition of HCl.

Table 4. Summary of the oxidation-reduction reaction with HCl and H₂O₂

		1.40 Stoichiometric amount of HCl	0.70 Stoichiometric amount of HCl	0.35 Stoichiometric amount of HCl
Initial Solution State		pH=1.63, ORP=454		
Concentration of [Fe ²⁺]		0.05%	0.82%	1.88%
Concentration of [Fe ³⁺]		15.1%	11.6%	7.6%
Mole Ratio of [Fe ³⁺]/[Fe ²⁺]		310.3	11.1	3.2
Final Solution State	ORP (mV)	583	567	538
	pH	-0.81	-0.51	0.05

과산화수소를 필요한 양에 대하여 약 0.23배의 첨가하였을 경우는 산화율이 35% 정도가 되었으며, 필요한 양 대비 1.17배의 경우에는 약 99%로 산화가 거의 이루어짐을 알 수 있었다. 이때의 [Fe³⁺]/[Fe²⁺]의 몰 비는 약 310이었다.

염산의 양을 당량 대비 0.7로 첨가하여 과산화수소를 필요한 양 대비 1.17배로 첨가한 경우에는 [Fe²⁺]의 농도가 약 0.8% 분석되었으며, 이를 산화량으로 환산하여 보면 약 74%로 완전히 산화가 이루어지지 못함을 알 수 있었다.

마지막으로 염산의 양을 당량 대비 0.35로 첨가하여 과산화수소를 필요한 양 대비 1.17배로 첨가한 경우에는 [Fe²⁺]의 농도가 약 1.9% 분석되었으며, 이를 산화량으로 환산하여 보면 약 37%였다. 결론적으로 염산 및 과산화수소를 이용한 산화에는 과량의 염산 및 과산화수소를 이용하면 약 99% 산화가 이루어짐을 알 수 있었다.

상기 실험 결과를 바탕으로 [Fe³⁺]와 [Fe²⁺]가 혼재된 용액을 제조하여 염산과 과산화수소를 첨가하여 Fe²⁺의 산화실험을 실시하였다. 제조된 용액의 [Fe³⁺]/[Fe²⁺]의 몰 비는 약 10.7이었으며, 염산 및 과산화수소의 양은 필요한 양의 1.4배 및 1.2배로 하였으며, 산화환원 반응 후의 [Fe³⁺]/[Fe²⁺]=53.2로 상당히 산화가 진행됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 금속에칭에 이용되는 FeCl₃ 용액이 사용 후 환원되어 재사용이 못하는 상태일 경우, 염산과 과산화수소를 이용하여 에칭구액을 재사용할 수 있도록 그 메커니즘에 대하여 실험을 실시하였다. 염산과 과산화수소를 활용한 산화반응에 대한 Nernst식에 의하면,

염산에 의한 pH 변화 및 산화반응을 위한 과산화수소의 농도에 의해 산화환원 전위가 증가하며, 산화가 바로 진행되면서 산화환원 전위가 감소하는 것으로 나왔으며, 실험을 통하여 그 결과를 확인할 수 있었다. 또한 완전 산화를 위하여서는 염산 및 과산화수소의 양은 필요한 양의 1.4배 및 1.2배로 첨가하였을 경우, 약 99% 산화가 이루어짐을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20165020301150).

References

1. H. Lee et al., 2012 : *Wet etching of stainless steel foil by aqueous ferric chloride solution*, Korean Chem. Eng. Res., 50(2), pp211-216.
2. D. Yoon, G. Lee, and C. Park, 2000 : *Studies on the Ferric Chloride Etching of Shadow Masks*, Hwahak Konghak, 38(3), pp393-397.
3. D. M. Allen and L. T. Ler, 1999 : *Increasing utilisation efficiency of ferric chloride etchant in industrial photochemical machining*, J. Environ. Monit., 1, pp103-108.
4. H. Lee et al., 2013 : *Regeneration of waste ferric chloride etchant HCl and H₂O₂*, Appl. Chem. Eng., 24(1), pp67-71.
5. D. M. Allen and H. J. A. Almond, 2004 : *Characterisation of aqueous ferric chloride etchants used in industrial photochemical machining*, J. Materials Processing Technology, 149, pp238-245.
6. K. K. Yoo et al., 2008 : *Separation of Ni and Fe from H₂SO₄ leaching solution of scrapped Fe-Ni alloy*, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 17(1), pp80-87.
7. H. Lim, K. et al., 2005 : *Theoretical Understanding of Fenton Chemistry*, Korean Ind. Eng. Chem., 16(1), pp9-14.

**김 대 원**

- 동경공업대학교 재료과학과 박사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 수석연구원

**박 일 정**

- 성균관대학교 신소재공학과 박사
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원

**김 건 홍**

- 한양대학교 신소재공학과 석사
- 이주대학교 재료공학과 박사수료
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 선임연구원

**이 상 우**

- 홍익대학교 무기재료공학과 학사
- 현재 (주)케이엠씨 기술이사, 기업부설 연구소 소장

**최 희 락**

- 동경공업대학 재료과학 박사
- 현재 부경대학교 재료공학과 교수

**정 항 철**

- 이주대학교 재료공학과 박사수료
- 현재 고등기술연구원 신소재공정센터 책임연구원