

Removal and Decomposition of Impurities in Wastewater From the HyBRID Decontamination Process of the Primary System in a Nuclear Power Plant

원전 일차계통 HyBRID 제염공정 발생 폐액 내 불순물 제거 및 분해

Hee-Chul Eun^{1,*}, Jun-Young Jung², Sang-Yoon Park¹, Jeong-Sun Park², Na-On Chang³, Hui-Jun Won¹, Ji-Hyoung Sim¹, Seon-Byeong Kim¹, and Bum-Kyoung Seo¹

¹Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Chungnam National University, Daehakro 99, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

³Hanyang University, Wangsimni-ro 222, Seongdong-gu, Seoul, Republic of Korea

은희철^{1,*}, 정준영², 박상윤¹, 박정순², 장나온³, 원휘준¹, 심지형¹, 김선병¹, 서범경¹

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

²충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

³한양대학교, 서울특별시 성동구 왕십리로 222

(Received October 8, 2019 / Revised December 6, 2019 / Approved December 18, 2019)

Decontamination wastewater generated from the HyBRID decontamination process of the primary system in a nuclear power plant contains impurities such as sulfate ions, metal ions containing radioactive nuclides, and hydrazine (carcinogenic agent). For this reason, it is necessary to develop a technology to remove these impurities from the wastewater to a safe level. In this study, it has been conducted to remove the impurities using a decontamination wastewater surrogate, and a treatment process of the HyBRID decontamination wastewater has been established. The performance and applicability of the treatment process have been verified through 1 L scale of replicates and a pilot scale (300 L/batch) test.

Keywords: Nuclear power plant, Primary system, HyBRID decontamination process, Decontamination wastewater, Treatment process

*Corresponding Author.

Hee-Chul Eun, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: ehc2004@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2712

ORCID

Hee-Chul Eun <http://orcid.org/0000-0001-8350-2935>
 Sang-Yoon Park <http://orcid.org/0000-0001-7982-873X>
 Na-On Chang <http://orcid.org/0000-0002-0574-8822>
 Ji-Hyoung Sim <http://orcid.org/0000-0002-0864-6071>
 Bum-Kyoung Seo <http://orcid.org/0000-0002-1981-7841>

Jun-Young Jung <http://orcid.org/0000-0001-6281-9407>
 Jeong-Sun Park <http://orcid.org/0000-0001-7192-0099>
 Hui-Jun Won <http://orcid.org/0000-0002-8833-7526>
 Seon-Byeong Kim <http://orcid.org/0000-0002-0420-7047>

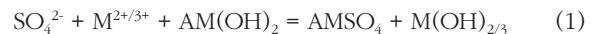
원전 일차계통 HyBRID 제염공정에서 발생하는 제염폐액에는 황산이온과 방사성 핵종을 포함한 금속이온 및 발암성 물질의 하이드라진을 포함하고 있어 이를 안전한 수준으로 처리할 수 있는 기술개발이 필요하다. 본 연구에서는 모의 제염폐액 내 황산 및 금속이온의 제거와 하이드라진의 분해시험을 실시하여 황산이온, 금속이온 및 하이드라진을 효과적으로 제거할 수 있는 HyBRID 제염폐액 처리공정을 도출하였으며, 1 L 규모에서의 반복실험과 Pilot 규모(300 L/batch)에서의 평가시험을 통해 도출한 HyBRID 제염폐액 처리공정의 성능 재현성과 적용성을 검증하였다.

중심단어: 원전, 일차계통, HyBRID 제염공정, 제염폐액, 처리공정

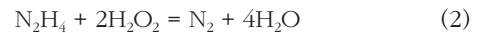
1. 서론

고온(> 270℃) 및 고압(약 16 MPa)의 냉각수가 순환되는 원전 일차계통 표면에는 내층과 외층으로 구성된 이중층 구조의 부식산화막이 형성된다. 내층은 금속모재의 부식에 의해 성장한 크롬(Cr)이 주성분인 부식산화물층이며, 외층은 일차계통 내에서 순환하는 크러드(crud)와 용해된 금속의 침적에 의해 형성된 철(Fe)이 주성분인 부식산화물층이다[1]. 이중층 구조의 부식산화막이 형성되는 과정에서 ^{60}Co 과 같은 방사성핵종이 혼입되며, 이러한 부식산화막이 일차계통 내부에 축적될 경우 열교환 효율이 감소될 수 있고, 방사성물질들이 일차계통 내 축적될 수 있다[2]. 이러한 일차계통의 유지보수과정에서 작업자의 방사선에 대한 노출을 감소시키고, 일차계통 내부의 방사성 핵종을 포함한 부식산화막을 분산 없이 효과적으로 제거하기 위해 화학적 제염공정들이 많이 활용되고 있다[2,3]. 현재 활용되고 있는 상용제염공정은 대부분 유기산을 사용하며, 이러한 상용제염공정에서는 일차계통 모재의 손상과 금속이온의 킬레이트 형성에 따른 제염폐액 처리의 어려움 등의 문제점들이 제기되고 있다[1,4]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 한국원자력연구원에서는 무기산을 이용한 HyBRID 제염공정을 개발하여 상용제염공정과 유사한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다[5]. HyBRID 제염공정은 제염제로 황산(H_2SO_4), 과망간산 칼륨(KMnO_4), 하이드라진(N_2H_4) 및 황산구리(CuSO_4) 등을 사용하며, 제염공정 수행 후 황산이온 및 방사성 핵종을 포함하는 금속이온과 발암성 물질인 하이드라진을 함유한 방사성 제염폐액이 발생된다. 따라서, 제염폐액 내 이온성분들을 분리/제거하고, 하이드라진을 분해하여 제염폐액을 안전한 수준으로 처리할 수 있는 기술개발이 필요하다.

일반적으로 수용액 내 황산 및 금속이온은 식 (1)과 같은 반응으로 수행되는 알칼리토 금속(AM(Alkaline earth Metal): Mg, Ca, Ba, Sr) 수산화물을 이용한 침전반응을 통해 효과적으로 제거할 수 있다[6].



수용액 내 존재하는 하이드라진은 산화제(NaOCl , CaO-Cl_2)를 이용하여 분해가 가능하나 부가적으로 처리해야 하는 부산물이 발생된다[7]. 하이드라진은 과산화수소(H_2O_2)를 이용하여 식 (2)와 같은 반응으로 부가적으로 처리해야 하는 부산물의 발생 없이 분해하는 것이 가능하다. 그러나 이 반응은 운전조건에 따라 효율이 달라질 수 있어 최근에는 과산화수소와 UV 또는 초음파를 복합적으로 사용하여 하이드라진 분해효율을 높이고자 하는 연구가 진행되어 왔으나[8], 이러한 방법들은 공정이 복잡해지는 단점을 보유하고 있어 가능한 한 공정을 단순화하기 위해서는 과산화수소를 이용하여 하이드라진을 분해하기 위한 최적의 조건을 도출하는 것이 효과적이라 판단된다.



본 연구에서는 원전 일차계통 HyBRID 제염공정에서 발생하는 제염폐액 내 불순물들을 효과적으로 처리하기 위한 제염폐액 처리공정을 수립하고자 모의 제염폐액 내 황산 및 금속이온의 제거와 하이드라진의 분해시험을 실시하였으며, 이 결과를 바탕으로 제염폐액 처리공정을 도출하여 성능을 평가한 후 Pilot 규모(300 L/batch)의 시험장치를 이용하여 도출한 제염폐액 처리공정의 적용성을 검증하였다.

Table 1. Composition of decontamination wastewater surrogate used in this study

Compounds or Ions	Concentration [ppm]
SO ₄ ²⁻	3,600 ~ 3,700
Mn ²⁺	348
N ₂ H ₄	1,600
Cu ²⁺	32
Fe ²⁺	
Cr ²⁺	50
Ni ²⁺	
Co ²⁺	

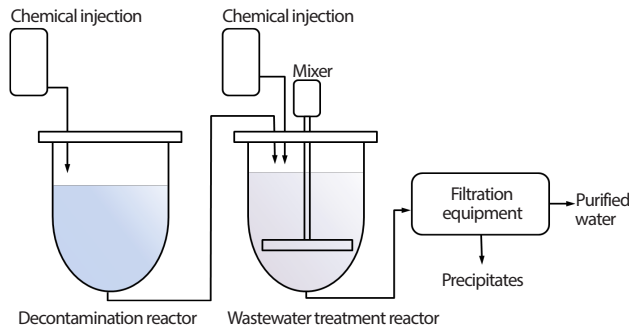


Fig. 1. Schematic diagram of the pilot-scale system for the SP-HyBRID decontamination.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서 HyBRID 제염공정 발생 제염폐액 내 불순물 처리실험을 수행하기 위해 HyBRID 제염공정에서 사용되는 첨가제와 제염대상 주요 금속(Fe, Cr, Ni) 및 방사화 금속(Co)을 기반으로 모의 제염폐액을 제조하였으며 [9], 세부조성은 Table 1에 나타내었다. 제염공정 첨가제로 KMnO₄ (Daejung, 99.3%), H₂SO₄ (Showa, 97%), N₂H·H₂O (Junsei, 98%), CuSO₄ (Junsei, 97.5%) 등을 HyBRID 제염공정에서의 농도를 기준으로 사용하였으며, 제염대상 주요 금속과 방사화 금속은 독일 원전 계통제염 자료를 참고하여 FeSO₄·8H₂O (Sigma aldrich, 99%), CrKSO₄·12H₂O (Kanto, 99.5%), NiSO₄·6H₂O (Junsei, 99%), CoSO₄·7H₂O (Showa, 98%) 등을 50 ppm의 농도조건에서 사용하였다[10].

HyBRID 제염폐액 처리공정을 수립하기 위해 모의 제염폐액 내 불순물 처리실험은 실온의 1 L 모의 제염폐액을 대상으로 유리비커에서 수행하였으며, 불순물 처리실험을 위한 반응이 효과적으로 진행되도록 하고자 500 rpm의 교반속도에서 실시하였다. 특히, 과산화수소를 이용한 하이dra진 분해실험은 최적의 분해조건을 도출하기 위해 pH의 변화(3.0 ~ 12.0)에 따른 분해특성을 평가하였으며, 이 결과를 바탕으로 제염폐액 처리공정을 수립하였다.

상기에서 수립된 제염폐액 처리공정의 적용성을 검증하기 위해 Fig. 1에 나타난 파일럿 규모(300 L/batch)의 HyBRID 제염 및 폐액처리장치를 이용하여 모의시편을 대상으로 제염공정을 수행한 후 발생하는 제염폐액 처리시험을 실시하였다.

이상의 실험에서 시료 내 황산이온과 하이dra진의 농도분석은 UV-VIS spectroscopy (Hach, DR5000)를 이용하여 측정하였고, 시료 내 금속이온 농도는 ICP-OES (Analytikjena, PQ9000)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 무기이온 침전

HyBRID 제염폐액 내 불순물로 존재하는 황산 및 금속이온은 식 (1)에 나타난 바와 같이 알칼리토 수산화물을 이용한 침전반응을 통해 용액 내 불용성 또는 용해도가 낮은 금속 수산화물 형태로 전환시켜 분리/제거할 수 있다. 일반적으로 많이 활용되고 있는 알칼리토 수산화물에는 칼슘 수산화물(Ca(OH)₂), 스트론튬 수산화물(Sr(OH)₂), 바륨 수산화물(Ba(OH)₂) 등이 있다. 이러한 알칼리토 수산화물 중에서 적절한 침전반응 첨가제를 선정하기 위해서는 황산이온과의 반응성과 반응생성물인 알칼리토 황산화물의 물에 대한 용해도가 중요한 요인이 될 수 있다. 따라서, 상기 세 가지의 알칼리토 수산화물과 황산이온과의 반응에 대한 자유에너지와 이 반응에서 생성된 황산화물의 물에 대한 용해도를 Table 2에 나타내었다. 이 때 Table 2에서 알칼리토 수산화물과 황산이온과의 반응에 대한 자유에너지는 열역학적 평형계산 프로그램(HSC-Chemistry 9.1)을 이용하여

Table 2. Gibb's free energies of the reactions between SO_4^{2-} and alkali earth hydroxides and solubility of alkali earth sulfates

Reaction	Gibb's free energy [kcal]	Compound	Solubility [g/mL]
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{SO}_4^{2-} = \text{CaSO}_4 + 2\text{OH}^-$	0.670	CaSO_4	2.4×10^{-3} (20°C)
$\text{Sr(OH)}_2 + \text{SO}_4^{2-} = \text{SrSO}_4 + 2\text{OH}^-$	-8.072	SrSO_4	1.4×10^{-4} (25°C)
$\text{Ba(OH)}_2 + \text{SO}_4^{2-} = \text{BaSO}_4 + 2\text{OH}^-$	-15.373	BaSO_4	2.4×10^{-6} (20°C)

Table 3. Residual concentration of sulfate and metal ions in the wastewater surrogate after the precipitation process

Ions	SO_4	Fe	Cr	Ni	Co	Mn	Cu	Ba
Concentration	81	ND	ND	ND	ND	ND	0.720	0.411

산출하였다[11]. Table 2에서 볼 수 있듯이 황산이온과의 반응이 가장 우수하고 반응생성물의 용해도가 가장 낮은 경우는 바륨 수산화물을 이용하는 경우임을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 제염폐액 내 황산 및 금속이온의 침전/제거를 위한 첨가제로 바륨 수산화물을 선정하였다.

본 연구에서 HyBRID 제염폐액 내 황산 및 금속이온을 포함하는 무기이온과 하이드라진을 제거한 후 발생하는 제염폐액 처리용액은 외부환경으로 방출될 수 있음을 고려하여 황산 및 금속이온의 잔류농도를 음용수 수질기준 이하까지 제거하는 것을 목표로 두었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 제염폐액 내 존재하는 황산이온의 농도는 3,600~3,700 ppm이며, 황산이온의 음용수 수질기준은 200 ppm 미만이다. 바륨 수산화물을 이용하여 황산이온을 제거하는 침전반응은 효과적으로 진행될 수 있으나, 바륨 수산화물을 반응당량만큼 주입할 경우 잔류하는 미반응 바륨 수산화물이 존재할 수 있으며, 이로 인해 잔류하는 바륨이온의 농도가 일정 기준농도보다 높을 경우 이를 다시 처리해야 하는 문제점이 발생될 수 있다. 이러한 점들을 고려하여 바륨 수산화물의 주입량은 식 (1)을 기준으로 황산이온과의 반응당량의 98% 수준에서 주입하는 것으로 결정하였다. 이러한 조건에서 HyBRID 모의 제염폐액 내 바륨 수산화물을 주입하여 침전반응을 수행한 후 잔류하는 황산 및 금속이온의 농도를 Table 3에 나타내었다. 바륨 수산화물을 이용한 침전반응은 급속히 진행되었으며, 1 L 용량의 제염폐액을 기준으로 10분 이내에 침전반응이 거의 종료되었다. Table 3에서 볼 수 있듯이 황산이온은 80 ppm 수준의 농도까지 제거할 수 있었으며,

바륨 수산화물을 반응당량 미만으로 주입한 상황에서도 바륨이온이 0.4 ppm 수준에서 잔류하였으나, 이 값은 바륨이온의 음용수 수질기준(0.7 ppm)보다 낮은 수준임을 알 수 있다. 잔류하는 금속이온의 농도는 구리이온을 제외하고 모두 ICP-OES 분석농도의 검출한계 미만인 것으로 확인되었으며, 잔류하는 구리이온의 농도 또한 음용수 수질기준 미만이었다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때 바륨 수산화물을 반응당량의 98% 수준으로 주입한 조건에서 황산 및 금속이온을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 사용한 pH 2.8 수준의 모의 제염폐액은 상기의 황산 및 금속이온의 제거공정 후 pH가 11.5~12.0 수준까지 증가되어 pH 변화가 넓게 진행됨을 알 수 있었다.

3.2 하이드라진 분해/제거

식 (2)와 같이 과산화수소를 이용한 수용액 내 하이드라진의 분해반응은 pH에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[12]. 3.1에서 언급한 바와 같이 제염폐액 내 황산 및 금속이온을 제거하는 과정에서 제염폐액의 pH는 2.8에서 12.0 수준까지 변화된다. 따라서, 하이드라진을 효과적으로 분해할 수 있는 pH 조건은 HyBRID 제염폐액을 처리하기 위한 공정의 수렴에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 점을 고려하여 pH 변화에 따른 하이드라진의 분해특성을 평가하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이 때 폐액 내 pH는 Ba(OH)_2 를 이용하여 조절하였다. 식 (2)에 따르면, 하이드라진을 분해하기 위해서 몰비 2.0의 과산화수소가 필요함을 알 수

Table 4. Residual concentration of hydrazine in the wastewater surrogate after the decomposition process with the pH levels

pH (25℃)	3.03	4.93	6.58	7.86	8.84	9.06	10.52	12.01
Concentration	1,150	790	270	52.7	0.075	0.008	0.161	0.930

[ppm]

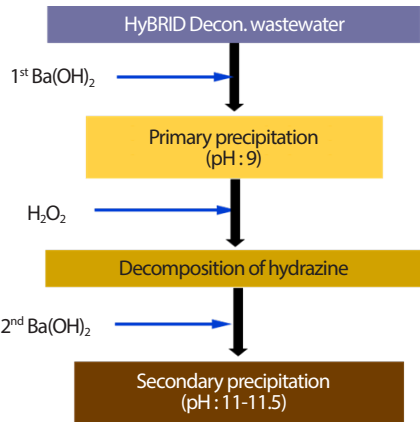


Fig. 2. Flow diagram of the treatment process for the HyBRID wastewater.

있으며, pH 변화에 따른 하이드라진의 분해를 효과적으로 수행하기 위해 과산화수소의 주입 몰비를 반응당량의 몰비보다 높은 2.5로 선정하였다. Table 4에 따르면, 하이드라진의 분해는 pH 9에서 가장 효과적으로 진행되어 하이드라진을 0.01 ppm 수준까지 제거할 수 있었으며, pH가 9보다 증가되면 분해효과가 감소되었다. 이전의 연구자료에 따르면, 하이드라진의 분해는 pH가 증가할수록 효과적으로 진행될 수 있는 것으로 보였으나, 본 연구에서는 이와 다른 경향을 보임을 알 수 있다[12]. 하이드라진의 분해 후 폐액 내 pH는 감소되었고, 감소되는 pH의 폭은 폐액의 pH가 높을수록 증가하였으며, pH가 감소되는 폭은 약 0.5~1.5 수준이었다. 이와 같이 하이드라진의 분해 후 pH가 감소되는 것은 약산의 성질을 띠는 과산화수소를 주입하여 약염기의 하이드라진의 분해를 진행하였기 때문으로 사료된다. 또한, 과산화수소를 이용한 하이드라진의 분해는 하이드라진의 잔류농도가 감소할수록 반응속도가 감소되는 현상이 두드러지게 나타나는 것으로 확인되었으며, 하이드라진을 분해할 경우에는 이 현상을 고려하여 하이드라진 분해를 위한 충분한 시간을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 1 L 규모의 비커에서 500 rpm의 교반속도로 공정이 진행될 경우 30분 수준에서 하이드라진의

분해반응이 거의 종료되는 것으로 확인되었으며, 이와 유사한 교반효과를 구현할 수 있는 반응기의 경우 공정시간을 30분 수준으로 산정하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3.3 HyBRID 제염폐액 처리공정 성능 검증

상기의 제염폐액 내 무기이온 및 하이드라진 제거시험 결과를 바탕으로 Fig. 2와 같은 HyBRID 제염폐액 처리공정을 수립하였다. 수립된 제염폐액 처리공정은 1차 침전과 하이드라진 분해 그리고 2차 침전 등으로 구성되며, 이러한 제염폐액 처리공정은 하이드라진을 효과적으로 분해할 수 있는 조건과 무기이온을 효과적으로 처리하기 위해 제염폐액의 최종 pH를 11.0 이상으로 제어할 수 있는 조건 등을 기반으로 도출되었다. 특히 하이드라진 분해의 효과를 극대화하기 위해 1차 침전공정이 pH 9 수준에서 종료되는 것이 필수적인 운전조건이다. 이를 위해 1차 침전공정을 수행하기 위한 바륨 수산화물의 적정량을 결정하고자 바륨 수산화물의 주입량에 따른 제염폐액의 pH 변화를 살펴보았으며, 무기이온 제거실험에서 주입한 바륨 수산화물 양의 80wt%를 주입하였을 때 제염폐액 내 pH가 9.0~9.15 수준으로 제어될 수

Table 5. Concentration of impurities in the wastewater surrogate after the 1 L scale test

Sample No.	SO ₄	N ₂ H ₄	Metal ions					
			Fe	Cr	Ni	Co	Mn	Ba
S1	112	0.020	ND	ND	ND	ND	ND	0.071
S2	125	0.016	ND	ND	ND	ND	ND	0.076
S3	121	0.025	ND	ND	ND	ND	ND	0.080

Table 6. Concentration of impurities in the decontamination wastewater after the pilot scale (300 L) test

Item	pH (25°C)	SO ₄ ²⁻ [ppm]	N ₂ H ₄ [ppm]	Metal ions [ppm]				
				Fe	Cr	Ni	Mn	Ba
Purified water	11.03	110	0.014	ND	ND	ND	ND	0.019

있음을 확인하였다. 이 자료를 이용하여 1차 침전은 바륨 수산화물 총 주입량의 80wt%를 주입하여 수행하고, 2차 침전 때 바륨 수산화물 총 주입량의 나머지인 20wt%를 주입하여 수행하는 것으로 결정하였다. 이와 같이 수립된 제염폐액 처리공정의 성능을 평가하고자 1 L 규모의 제염폐액을 이용하여 1차 침전과 하이드라진 분해 그리고 2차 침전 등을 순차적으로 진행한 후 시료를 채취하여 무기이온 및 하이드라진의 농도를 분석하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 제염폐액 처리공정의 성능평가시험은 성능의 재현성을 고려하여 동일조건에서 반복실험을 3회 실시하였다. Table 5에서 볼 수 있듯이 모의 제염폐액을 이용한 처리공정 성능평가 시험에서 황산이온은 112 ~ 125 ppm 수준까지 제거되었고, Cu 이온을 제외한 모든 금속이온들은 ICP-OES 분석농도의 검출한계 미만으로 처리되었으며, Cu 이온은 음용수 수질기준 미만의 농도까지 제거될 수 있음을 확인하였다. 이 결과는 3.1에 나타낸 무기이온 제거시험의 결과와 유사한 경향임을 알 수 있다. 침전반응 후 최종적으로 잔류하는 Ba의 농도는 0.071~0.080 ppm 수준으로 상당히 낮은 값을 보였고, 이때 최종 처리용액의 pH는 11.2 수준이었으며, 3.1의 결과와 비교할 때 pH가 11에 근접할 때 Ba의 잔류농도가 낮고 황산이온과 바륨 수산화물의 반응효율이 증가되는 것으로 사료된다. 하이드라진 또한 0.016~0.025 ppm 수준까지 분해되어 3.2에서 언급한 결과와 유사한 분해결과를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서, 1차 침전과 하이드라진 분해 그리고 2차

침전 등으로 구성된 공정을 HyBRID 제염폐액 처리공정으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

상기에서 구축한 제염폐액 처리공정의 적용성을 평가하기 위해 300 L 규모의 HyBRID 제염 및 폐액처리장치에서 Fe, Cr 및 Ni 산화물을 함유한 모의시편의 제염 후 발생하는 제염폐액을 대상으로 제염폐액 처리공정의 적용시험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에 따르면, 황산과 Cu를 포함하는 금속이온이 제염폐액 처리공정 성능평가시험의 결과에서와 같이 효과적으로 제거될 수 있음을 알 수 있으며, 하이드라진 또한 0.01 ppm에 근접한 수준까지 분해/제거할 수 있음을 확인할 수 있었다. 최종 처리용액 내 Ba 잔류농도는 0.019 ppm으로 가장 낮은 값을 보였으며, 이 때 최종 처리용액의 pH는 11.03으로 최종 침전공정 후 처리용액의 pH 중 가장 낮은 값을 보였다. 이를 통해 pH가 11 수준에 가까울수록 황산이온과 바륨 수산화물의 반응효율은 향상될 수 있음을 재확인할 수 있었다. 이상의 결과를 종합해 볼 때 상기의 도출된 제염폐액 처리공정을 이용하여 HyBRID 제염폐액을 효과적으로 처리할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 공정을 HyBRID 제염폐액 처리공정으로 이용할 경우 방사성폐기물 발생량을 현저하게 감소시킬 수 있으며 [9], 부가적으로 처리해야 할 방사성 폐수지 발생량 또한 현저하게 감소되어 2차 폐기물 처리에 대한 부담감이 크게 감소될 수 있다. 또한, 제염폐액 처리공정을 통해 발생하는 폐기물의 대부분은(> 95wt%) 열화학적으로 안정한

BaSO₄ (mp.: 1,580°C) 형태의 입자들로 최종처분을 위한 고형화가 용이할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 원전 일차계통 HyBRID 제염공정에서 발생하는 제염폐액처리의 최적공정을 수립하고자 모의 제염폐액 내 황산 및 금속이온의 제거와 하이드라진의 분해시험을 실시하여 황산이온 및 금속이온을 각각 음용수 수질기준과 검출한계수준 미만으로 제거할 수 있고, 하이드라진을 0.01 ppm에 근접하는 수준까지 제거할 수 있는 HyBRID 제염폐액 처리공정을 도출한 후 1 L 규모에서의 반복실험과 Pilot 규모(300 L/batch)에서의 평가시험을 통해 공정성능의 재현성과 적용성을 검증함으로써 현장에서 활용할 수 있는 HyBRID 제염폐액처리 최적공정을 개발하였다.

감사의 글

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력기술개발사업, 2017M2A8A5015144).

REFERENCES

- [1] S. Kim, S. Park, W. Choi, H. Won, J. Park, and B. Seo, "Magnetite dissolution by copper catalyzed reductive decontamination", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, 16(4), 421-429 (2018).
- [2] C.J. Wood, "A review of the application of chemical decontamination technology in the United States", *Prog. Nucl. Energy*, 23(1), 35-80 (1990).
- [3] D. Bradbury, Review of decontamination technology development 1977-2000, Water chemistry of nuclear reactor systems 8, London (2001).
- [4] S.B. Kim, H.J. Won, J.K. Moon, and W.K. Choi, "Magnetite dissolution using hydrazine-acid solution for chemical decontamination", *Trans. Am. Nucl. Soc., Las Vegas* (2016).
- [5] W.K. Choi, H.J. Won, J.H. Jung, S.Y. Park, and S.B. Kim et al., Development of decommissioning decontamination, and remediation technology for nuclear facilities: development of advanced decontamination technology for nuclear facilities, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/RR-4230 (2016).
- [6] V. Bologo, J.P. Maree, and F. Carlsson, "Application of magnesium hydroxide and barium hydroxide for the removal of metals and sulfate from mine water", *Water SA*, 38(1), 23-28 (2012).
- [7] R. Tabaraki and A. Nateghi, "Application of taguchi L16 orthogonal array design to optimize hydrazine bio-sorption by sargassum ilicifolium", *Environ. Prog. Sustain. Energy*, 35(5), 1450-1457 (2016).
- [8] H. Nakui, K. Okitsu, Y. Maeda, and R. Nishimura, "Hydrazine degradation by ultrasonic irradiation", *J. Hazard. Mater.*, 146, 636-639 (2007).
- [9] J.Y. Jung, H.C. Eun, S.Y. Park, J.S. Park, N.O. Chang, S.B. Kim, B.K. Seo, and S.J. Park, "A study on the removal of impurities in a SP-HyBRID decontamination wastewater of the primary coolant system in a pressurized water reactor", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 318, 1339-1345 (2018).
- [10] C. Topf, L. sempere-Belda, K. Tscheschlok, and Reuschle, "Aqueous, in situ primary circuit decontamination", *Nucl. Eng. Int.*, 59(718), 16-18 (2014).
- [11] A. Roine, Outokumpu HSC chemistry for windows, Pori, Finland (2002).
- [12] D.V. Goia and E. Matijevic, "Preparation of mono-dispersed metal particles", *New J. Chem.*, 1203-1215 (1998).