

중성염 용액 내에서 우라늄으로 오염된 금속성 해체폐기물의 전해제염

Electrolytic Decontamination of the Dismantled Metallic Wastes Contaminated with Uranium Compounds in Neutral Salt Solutions

최왕규, 이성렬, 김계남, 원휘준, 정종현, 오원진
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

국내의 가동 중지된 우라늄 변환시설의 해체 시 다량의 우라늄으로 오염되어 있는 금속성 폐기물의 재활용 또는 자체처분을 위한 제염기술로 중성염 전해액을 사용하는 전해제염 공정의 적용성을 평가하기 위하여 우라늄 변환시설 내부설비의 주 구성 재료인 SUS-304 및 Inconel-600에 대한 전기화학적 용해거동 연구를 수행하였다. 이를 위하여 중성염 전해질의 형태, 전해질의 농도, 전류밀도, 처리시간과 같은 전해제염 조건들이 금속 재료의 용해에 미치는 영향을 평가하였다. 모의 시편을 사용한 비방사성 전해용해 실험 결과를 근거로 실제 우라늄 변환시설로부터 인출한 UO_2 , AUC (ammonium uranyl carbonate) 및 ADU (ammonium diuranate) 오염시편에 대해 Na_2SO_4 및 $NaNO_3$ 중성염 용액에서 전해 제염실험을 수행하였으며, 오염물의 종류 및 오염 준위의 대소와는 관계없이 모든 시편에 대하여 10분 이내의 짧은 시간 내에 자체처분 기준치 이하로 β 방사능 준위를 감소시킴으로써 본 중성염 전해제염이 매우 성공적임을 확인하였다.

Abstract

Electrolytic dissolution study was carried out to evaluate the applicability of electrochemical decontamination process using a neutral salt electrolyte as a decontamination technology for the recycle or self disposal with authorization of large amount of metallic wastes contaminated with uranium compounds generated by dismantling a retired uranium conversion plant using SUS-304 and Inconel-600 specimen as the main materials of internal system components of the plant. The effects of type of neutral salt as an electrolyte, current density, and concentration of electrolyte on the dissolution of the materials were evaluated. On the basis of the results obtained through the basic inactive experiments, electrochemical decontamination tests using the specimens contaminated with uranium compounds such as UO_2 , AUC (ammonium uranyl carbonate) and ADU (ammonium diuranate) taken from an uranium conversion plant were performed in Na_2SO_4 and $NaNO_3$ solution. It was verified that the electrochemical decontamination of the dismantled metallic wastes was quite successful in Na_2SO_4 and $NaNO_3$ neutral salt electrolyte by reducing β radioactivities below the level of self disposal with authorization within 10 minutes regardless of the type of contaminants and the degree of contamination.

1. 서론

국내의 경우 가동 중지된 핵연료주기시설의 하나로 현재 한국원자력연구소 내에 우라늄 변환 시설이 있으며, 이 시설은 환경복원 사업을 통해 대부분 금속성 내부 설비는 완전 해체 철거하고 건물은 재사용 할 예정으로 있다. 따라서 현재 당면하고 있는 우라늄 변환시설의 환경복원사업과 관련하여 변환시설 해체 시 방대한 양의 우라늄 함유 금속성 고체 폐기물이 발생하여 이의 효과적인 관리방안이 요구된다. 따라서 우라늄 변환시설의 해체 시 작업자의 안전성 확보와 발생하는 방사성 폐기물량의 저감을 위해서는 각각의 공정별 오염 특성을 고려한 제염 기술의 적용이 요구된다. 현재까지 폐기물 처분장을 확보하지 못한 국내의 상황과 원자력연구소 내 폐기물 임시저장고의 한계 등을 고려하면 우라늄변환시설의 해체에 의해 발생하는 다량의 금속성폐기물을 재활용하거나 자체처분 하는 것이 선택할 수 있는 폐기물 관리방안 중 한 가지로 여겨진다.

따라서 본 연구에서는 우라늄변환시설 해체 전 내부설비 오염표면 및 해체 후 부품표면에 대하여 재활용 또는 자체처분이 가능한 수준의 제염성능을 갖는 우라늄 화합물로 오염된 표면의 제염 기술을 개발하고자 하였다.

전해연마 또는 전기화학제염이라 부르는 전해제염 기술은 전기 분해의 원리를 이용하여 금속 표면에 존재하는 부식 산화막층 이나 기질금속(substrate)의 얇은 표면층이 전해질 용액 속으로 양극 산화반응에 의해 용출되어 제거됨으로써 방사성 오염이 제거되는 제염기술로 짧은 시간 내에 자연방사선 준위까지 낮추는 높은 제염계수를 얻을 수 있으며, 발생하는 2차 폐기물 양이 비교적 적고 제거된 표면이 부드럽게 처리되어 재 오염성이 작을 뿐만 아니라 기술이용이 용이하다[1].

상용 원전은 물론 핵연료 주기 시설에서 발생하는 알파, 베타 및 감마방사선 오염물에 의해 오염된 어떠한 금속폐기물도 전해 제염방법에 의해 무구속 방출 허용 기준치 이하로 제염시킬 수 있음이 해외의 여러 가지 제염사례에서 확인된 바 있고, 이에 따라 방사성 금속폐기물의 자체처분 및 재활용을 위한 표면제염 기술로써 전해제염 기술의 확보는 필수적인 것이 되었다. 이 전해제염 기술에서 양극과 음극사이의 전자 이동 경로를 제공해 주는 전해액은 크게 무기산 전해액, 유기산 전해액, 중성염 용액으로 구분할 수 있다. 황산나트륨이나 질산나트륨 같은 중성염 전해질을 이용한 전해제염은 전해 성능이 어느 정도 보장되면서도 2차 폐액이 중성으로 발생되므로 처리가 용이하고, 방사성 오염물이 수산화물 형태로 침전되어 슬러지를 형성함으로 이 슬러지를 제거시킴에 의해 방사성 폐기물 발생량을 크게 저감할 수 있다[2~6]. 이러한 장점에도 불구하고 인산, 황산 및 질산을 전해질로 사용하는 전해제염에 비하여 중성염을 사용하는 전해제염 연구는 그다지 많이 수행되지 않았고, 특히 우라늄 화합물로 오염된 금속 폐기물의 제염에 적용시킨 사례는 없었으며, 전해제염의 공정적인 면에 비하여 기초적인 정보가 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 우라늄 화합물로 오염된 스테인레스 스틸 및 인코넬 표면으로부터 중성염 전해질에 의한 우라늄 화합물의 전기화학적 분리를 통한 오염 표면의 제염 특성을 조사하였다. 이를 위하여, SUS-304 및 Inconel-600의 전해용해 특성이 우수한 중성염 용액을 선정하였고 전해제염공정의 운전변수인 전류밀도, 전해액 농도, 전해시간 등의 영향을 조사하였다. 한편, 변환시설의 공정조건 중 유동층 반응기가 고온에서 가동되었던 것을 감안하여 열처리 시편에 대한 전해제염 성능을 평가하였다. 모의시편을 사용한 비방사선 전해용해 시험 결과를 근거로 우라늄 변환시설 내에서 직접 인출한 우라늄화합물 오염시편의 전해제염 실증 실험을 통해 Na_2SO_4 및 NaNO_3 중성염 전해질을 이용한 전해제염 공정의 실증시험을 통해 본 연구에서 수행한 제염 공정의 성능을 평가하였다.

2. 실험

2.1. 오염설비 구조재질의 전해용해

우라늄 변환시설 해체 시 대량으로 발생될 우라늄 화합물로 오염된 부품의 전해제염 공정을 확립하기 위하여 다양한 시설 내부 설비 및 배관 등의 주 구성 재료인 스테인레스 스틸 및 인코넬을 대상으로 중성염 전해용액을 사용한 전해 용해 실험을 수행하였다. 이를 위해 Potentiostat/Galvanostat (JS-P500, 지상증전기)를 사용하여 세 개의 전극으로 구성된 고전적인 전해셀 내에서 제염대상물에 일정한 전류를 흘려주는 일정전류 방식으로 전해용해 실험을 수행하였다. 제염대상물이 되는 양극으로는 우라늄 변환시설 오염설비의 주된 재료인 SUS-304(Fe:74%, Ni:18%, Cr:8% [ASTM B 240])와 Inconel-600(Fe:8%, Ni:72%, Cr:15%[ASTM B 166])의 모의시편을 사용하였다. 모의시편은 시편의 노출 면적이 약 0.95 cm^2 인 홀더(K0105, EG&G)에 잘 맞도록 원형으로 가공하여 입자가 굵은 사포로부터 차례로 연마하여 최종적으로 $0.5 \mu\text{m}$ 알루미나 현탁액으로 처리하여 사용하였다. 기준 전극으로는 Ag/AgCl(saturated KCl)을 사용하였고, 상대전극으로 $2.5 \times 5 \text{ cm}$ 크기의 백금판을 사용하였다. 전해 시작 전 및 종료 후 SUS-304시편과 Inconel-600 시편의 무게를 측정하여 그 변화로부터 전해용해 특성을 평가하였다.

2.2. 우라늄화합물로 오염된 시설 인출시편의 전해제염

우라늄 변환 시설로부터 직접 인출한 UO_2 , AUC, ADU로 오염된 실제시편을 약 $4\sim 5 \text{ cm}^2$ 의 크기로 절단하여 중성염 전해용액 내에서 100 mA/cm^2 의 전류밀도로 전해제염 성능시험을 수행하였다. 이때 제염시간은 5분에서 1시간까지 변화시켰으며, 일정 시간간격으로 시편의 무게 감소와 동시에 전해제염 하기 전의 β 방사능과 전해제염 하고 난 후의 β 방사능을 측정하여 이로부터 제염 계수(DF)를 산정하여 제염 성능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염설비 구조재질의 전해용해

3.1.1. 전해용액에 따른 금속시편의 용해

전기화학 시스템에서 중요한 요소 중 하나인 전해 용액은 그 속에 포함되어있는 이온들에 의해 전류를 통하게 하는 매개체이다. 우라늄 오염설비 제염에 적합한 전해용액을 선정할 목적으로 본 연구에서는 중성염인 Na_2SO_4 및 NaNO_3 , 약염기인 Na_2CO_3 및 Na_3PO_4 와 약산인 $(\text{NH})_2\text{CO}_3$ 및 NH_4NO_3 에 대하여 각각의 농도가 0.5M이 되도록 전해용액을 제조한 후 각각의 전해용액 내에서 SUS-304와 Inconel-600 모의시편의 전해용해 거동을 조사하였다. 이 때 전해 용해실험은 25°C 로 유지되는 각각의 전해용액 내에서 52.6 mA/cm^2 의 전류밀도로 1시간동안 흘려보내준 조건으로 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 1 및 Fig. 2에 각각 수록하였다.

이 결과로부터 SUS-304와 Inconel-600 시편이 전해 용액에 따라 서로 다른 용해 특성을 보임을 알 수 있다. SUS-304시편의 경우 여러 가지 전해 용액들 중에서도 Na_2SO_4 중성염 용액에서 가장 무게감량이 크게 나타났고, 이는 다른 전해용액에서 보다 Na_2SO_4 전해용액 내에서 전해제염이 효과적으로 진행될 수 있음을 나타낸다. 한편 NaNO_3 중성염 용액에서 SUS-304 시편의 전해용해에 의한 무게감소는 Na_2SO_4 중성염 용액에 비해 약 30%의 효율을 보였다.

이와 반면에 Inconel-600의 경우는 SUS-304시편의 경우와는 다르게 Na_2SO_4 , NaNO_3 , NH_4NO_3 전해 용액에서 거의 비슷한 용해 효율을 보였고, 그 외 전해 용액의 경우에는 거의 질량감소가 나타나지 않았다. 본 실험결과로부터 Na_2SO_4 와 NaNO_3 전해질 내에서의 중성염 전해제염이 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 위 실험결과와 함께 제염성능이 좋고, 반응전과 후의 pH도 안정하며 공정 적용이 용이할 뿐 아니라 감용비가 큰 효과(기존 인산 전해액 방법의 1/30)

를 얻을 수 있어 2차 폐기물량이 매우 작다고 보고[7]되고 있는 Na_2SO_4 중성염 전해질과 우라늄 변환시설에서 정광(U_3O_8)을 포함한 우라늄 화합물의 용해 시 질산을 사용하였으며 불순물의 여과, 우라늄의 정제를 위한 모든 공정이 질산 매질에서 수행되었고 우라늄 변환시설의 가동 중에 발생한 액체폐기물 저장소인 Lagoon이 현재는 수분이 증발하고 NH_4NO_3 와 NaNO_3 의 구성성분으로 포화된 슬러지 상태로 존재하고 있는 연유로 질산 매질의 우라늄 용액을 취급했던 공정 및 설비표면에 가동 중 발생된 우라늄 슬러지 폐기물의 성상을 고려하여 관련된 시설물 제염에 Nitrate 형태의 NaNO_3 중성염을 사용하는 전해제염에 대한 운전변수의 영향을 파악하였다.

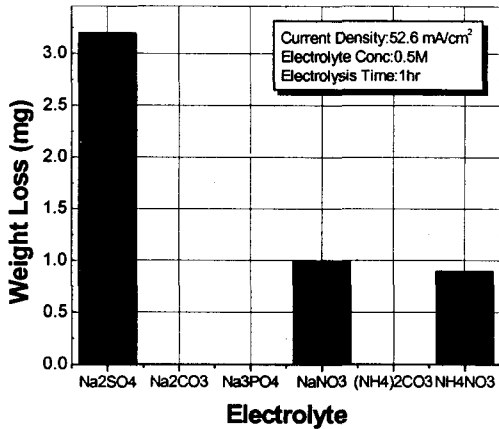


Fig. 1. Electrolytic dissolution characteristics of SUS-304 specimen in various electrolytes.

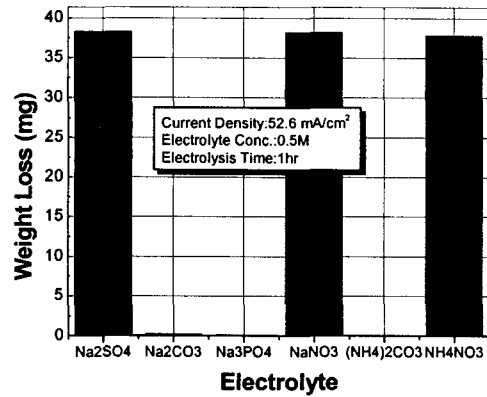


Fig. 2. Electrolytic dissolution characteristics of Inconel-600 specimen in various electrolytes.

3.1.2. 전류밀도에 따른 금속시편의 용해

중성염을 이용한 전해제염 시 적절한 전류밀도를 결정하기 위하여 전해 용해 성능이 우수하다고 평가된 Na_2SO_4 및 NaNO_3 용액에서의 SUS-304시편과 Inconel-600시편에 대하여 전류밀도의 영향을 살펴보았다. SUS-304시편의 경우는 총 흐른 전하량을 900 coulomb 및 450 coulomb이 되도록 하는 조건에서 전류밀도를 변화시켜가며 전해 용해 실험을 수행하였고, SUS-304시편보다 전해용해 성능이 월등한 Inconel-600의 경우는 전류밀도에 따라 Na_2SO_4 의 경우 150 coulomb, NaNO_3 의 경우는 75 coulomb이 되도록 하는 조건으로 전류밀도에 따른 무게 감량을 측정하여 그 결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 수록하였다.

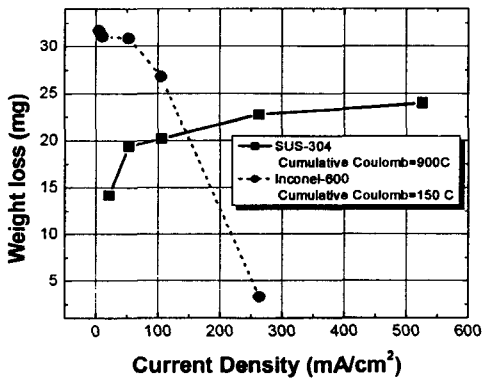


Fig. 3. Effect of current density on the electrolytic dissolution of metal specimen in 0.5M Na_2SO_4 solution.

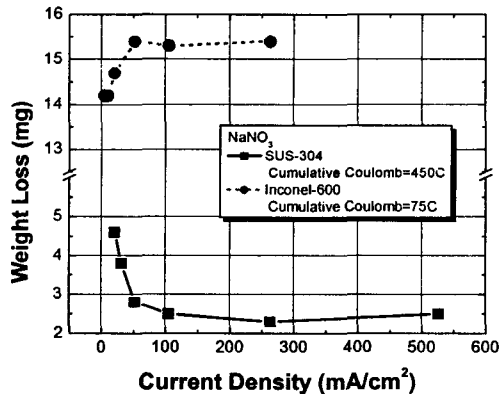


Fig. 4. Effect of current density on the electrolytic dissolution of metal specimen in 0.5M NaNO_3 solution.

Fig. 3에서 살펴보면 Na_2SO_4 용액에서 SUS-304시편을 전류밀도에 따라 전해제염 하였을 때 50 mA/cm^2 까지는 시편의 무게 감소율이 급격하게 증가하다가 100 mA/cm^2 이상의 전류밀도에서는 질량감소의 증가정도가 완만하게 나타났다. 전류밀도가 클수록 전해시간이 단축되면서 전해용해가 증가하는 경향을 보이므로 전해시간의 측면에서 본다면 높은 전류밀도가 효과적으로 보이며, 경제성을 고려한다면 단위면적당 전류를 흘려보낼 장치의 크기를 생각하여 너무 높지 않은 전류밀도를 선정하여 전해제염을 수행하여야 한다. Inconel-600시편의 경우는 SUS-304시편의 결과와는 반대로 약 50 mA/cm^2 의 전류밀도까지는 전해효율에 차이는 별로 없다가 50 mA/cm^2 이상에서는 전류밀도의 증가에 따라 시편의 질량 감소함으로써 전해효율이 감소하는 것으로 나타나 제염효율 및 적용시간을 고려하여 볼 때 50 mA/cm^2 의 전류밀도에서 전해제염을 수행하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

NaNO_3 전해용액에서 SUS-304시편의 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 전류밀도가 100 mA/cm^2 까지 감소함에 따라 전해제염 효율도 감소하며 100 mA/cm^2 이상에서는 전류밀도의 증가와는 무관하게 전해제염 효율이 거의 동일하게 나타났다. 이러한 결과로부터 전류밀도가 감소하면 전해제염 효율은 증가하지만 제염시간이 너무 길어지므로 제염시간을 고려한 적절한 전류밀도를 선택할 필요가 있다. 그와 동시에 전해제염 시간을 고려하여 100 mA/cm^2 이상의 전류밀도에서 전해제염이 이루어지는 경우 시편의 질량감소만을 고려할 때에는 전류밀도가 클수록 동일한 전해효율을 갖으면서 제염시간이 단축될 수 있으므로 더 큰 전류밀도를 선택하는 것이 유리하다고 판단된다. 그러나 전류밀도의 증가는 금속의 전해용해가 과부동태 영역에서 발생되도록 전위를 끌어올림으로 인해 전해연마라고도 불리는 전해제염이 갖을 수 있는 장점인 제염 후 표면의 균일성에 영향을 미치기 때문에 적절한 전류밀도의 선택이 중요하다고 판단된다. Inconel-600시편의 경우는 50 mA/cm^2 이상의 전류밀도에서는 시편의 질량 감소율이 더욱 증가하지 않고 일정한 것으로 보아 SUS-304시편과는 반대의 현상을 보여주며 이 경우에는 전해제염 시간을 고려하여 50 mA/cm^2 이상의 전류밀도에서 제염을 수행하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

3.1.3. 전해질 농도에 따른 금속시편의 용해특성

Na_2SO_4 및 NaNO_3 전해용액의 농도가 SUS-304시편과 Inconel-600시편의 전해제염 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 0.25M에서 5M까지 농도를 변화시켜가며 SUS-304시편의 경우 100 mA의 전류를 1시간동안 일정하게 가해주고 Inconel-600시편의 경우는 50 mA의 전류를 30분 동안 일정하게 흘려 보내주어 전해반응이 종료된 후 무게감소를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 수록하였다.

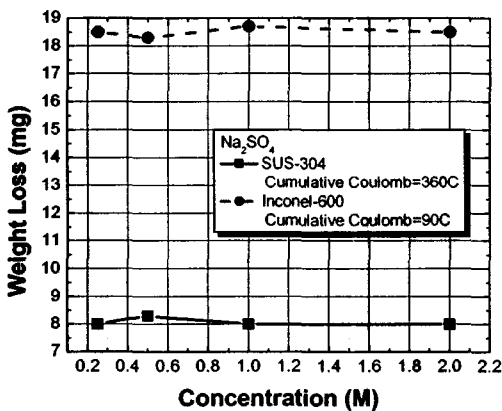


Fig. 5. Effect of Na_2SO_4 concentration on the electrolytic dissolution of SUS-304 and Inconel-600 specimen.

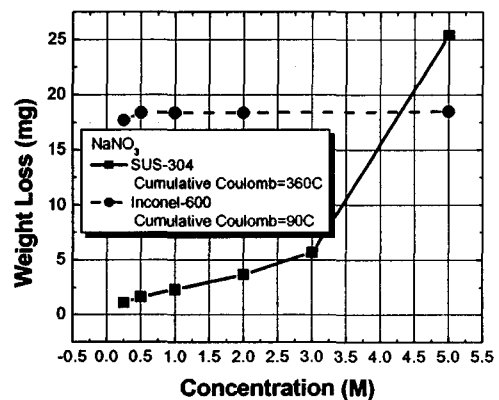


Fig. 6. Effect of NaNO_3 concentration on the electrolytic dissolution of SUS-304 and Inconel-600 specimen.

Fig. 6의 결과로부터 Na_2SO_4 전해용액의 농도가 증가되더라도 SUS-304 및 Inconel-600시편의 전해제염 효율에는 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이와는 반면에 NaNO_3 전해용액 내에서 SUS-304 시편의 경우 NaNO_3 전해용액의 농도가 증가함에 따라 시편의 무게감소가 3M까지는 완만하게 증가하다가 그 이상에서는 급격히 증가되는 현상을 보여주고 있다(Fig. 7). 이 결과를 통해서 SUS-304시편은 NaNO_3 용액의 농도가 증가됨에 따라 전해 용해 속도가 매우 증가됨으로써 농도가 높은 전해용액을 사용하면 전해제염 시간의 단축이 기대되는 것으로 보인다. 하지만 NaNO_3 전해용액의 농도가 높아질수록 금속시편의 표면은 Fig. 8에 수록한 바와 같이 매끄럽지 않고 매우 거칠어졌으며, 이는 점식(pitting)에 의한 것으로 판단된다.

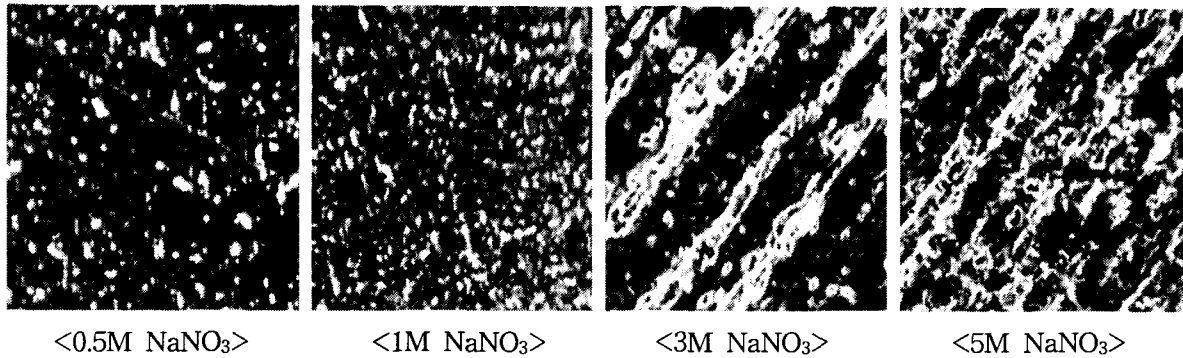


Fig. 8. Optical microscopic images of SUS-304 specimen surface after electrolytic dissolution with the variation NaNO_3 concentration.

3.1.4. 열처리 시편의 용해특성

우라늄 변환시설의 내부설비에서 공정들이 60°C 에서 650°C 의 온도 조건에서 가동되어 높은 온도에서 가동되었던 내부설비의 제염 시 그 적용성을 찾기 위하여 제염대상 공정설비의 가동온도와 동일한 온도로 열처리한 SUS-304 및 Inconel-600 예민화 시편을 가지고 NaNO_3 중성염 전해질에서 100 mA/cm^2 의 전류밀도를 한 시간 동안 가하여 나타나는 시편의 용해특성을 관찰하였으며 동일한 전해조건에서 아무런 처리도 하지 않은 시편을 전해제염 한 금속시편의 용해특성을 비교한 결과를 도식화하여 Fig. 9에 수록하였다.

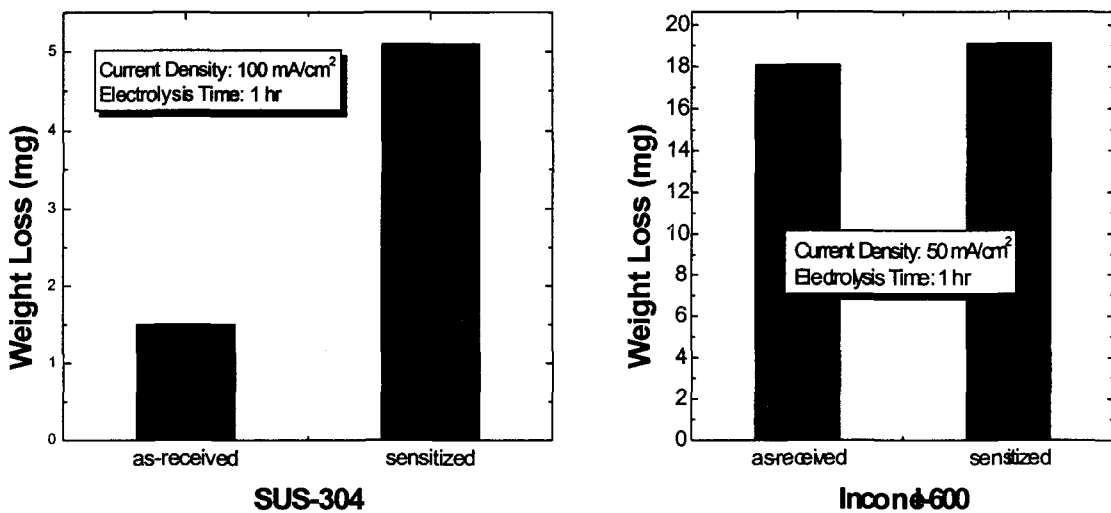


Fig. 9. Electrolytic dissolution performance of as-received and sensitized specimen.

SUS-304 시편의 경우 예민화 시편의 전해용해율이 그렇지 않은 시편에 비해 3배 이상 증가되었으며, 제염 후 표면도 매우 매끄러움을 확인 할 수 있었다. 따라서 고온의 조건에서 가동한 설비의 내부표면제염에 더욱 효과적으로 전해제염이 적용 가능함을 알 수 있었다.

3.2 우라늄화합물로 오염된 시설 인출시편의 전해제염

우라늄 변환 시설로부터 인출한 UO_2 , AUC, ADU 오염시편에 대해 그 표면적이 약 $4\sim 5\text{ cm}^2$ 의 크기로 절단하여 Na_2SO_4 및 $NaNO_3$ 전해용액을 사용하여 100 mA/cm^2 의 전류밀도로 시간을 변화시켜가며 전해제염 실증 시험을 수행하였다. UO_2 오염시편의 초기 β 방사능 오염도는 $160\sim 270\text{ cpm}$ 이었으며, AUC 오염시편의 초기 β 방사능 오염도는 $324\sim 490\text{ cpm}$ 이었고, ADU 오염시편의 초기 β 방사능 오염도는 $1700\sim 2420\text{ cpm}$ 이었다. 우라늄화합물로 오염된 각각의 인출시편에 대하여 Na_2SO_4 및 $NaNO_3$ 중성염 용액 내에서 제염시간을 5분에서 1시간까지 변화시켜가며 전해제염을 수행하였고 일정 시간간격으로 시편의 무게 감소와 동시에 전해제염 하기 전의 β 방사능과 전해제염 하고 난 후의 β 방사능을 측정하여 이로부터 제염계수(DF)를 산정하고 그 결과를 정리하여 Table 1에 수록하였다.

Table 1. Electrochemical decontamination results of metallic wastes contaminated with uranium compounds taken from an uranium conversion plant.

Contaminants	Electrolyte	Time (min)	β -Radioactivity			
			before [cpm]	after [cpm]	DF	Specific Activity [cpm/cm ²]
UO_2	Na_2SO_4	5	231.4	1.75	132.2	0.697
		10	233.4	1.1	212.1	0.3432
		20	244.02	0.95	258.9	0.552
		30	244.02	0.635	384.3	0.478
		60	269.22	0	$+\infty$	0
	$NaNO_3$	10	176.2	5.65	31.19	1.346
		20	160.65	2.69	59.83	1.001
		40	189.15	0.9	210.2	0.564
	60	189.15	0	$+\infty$	0	
AUC	Na_2SO_4	10	454.47	4.7	96.7	0.654
		30	489.57	1.15	425.7	0.127
		60	386.13	0.60	613.5	0.079
	$NaNO_3$	10	208.53	5.25	39.72	1.15
		30	385.50	5.37	71.79	0.649
		60	324.03	2.55	127.1	0.255
ADU	Na_2SO_4	10	1978.3	1.185	1669	0.171
		30	1951.0	1.765	2550	0.0905
		60	2418.6	0.43	5625	0.0489
	$NaNO_3$	10	1702.8	1.83	930.5	0.239
		30	1705.3	1.65	1034	0.219
		60	1759.5	0.85	2070	0.099

금속폐기물 표면에 오염된 우라늄화합물의 성상이 다를지라도 β 비방사능은 모두 전해제염 시간이 경과함에 따라 점점 낮아지고 있음을 볼 수 있으며, 10분 이내의 전해제염만으로도 자체처분 기준치($\beta = 0.4\text{ Bq/cm}^2$ [19.1 cpm/cm^2])를 충분히 만족하였다.

UO₂로 오염된 시편에 대하여 제염 전과 제염 후 시편의 표면상태를 SEM을 이용하여 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 수록하였다. β 비방사능 측정결과 (Table 1)로부터 예견할 수 있었던 사실과 동일하게 10분 이내의 제염으로도 방사능 오염입자가 거의 완전히 제거되었음을 알 수 있으며, 이 정도의 전해제염 시간을 적용함으로써 전해용액 중으로 용출되는 모재 금속의 양도 감소시킴으로써 이차폐기물의 양을 최소화시킬 수 있다고 판단된다. 또한 전해제염 시간이 더욱 경과하면 표면에 있는 미세 골짜기의 가장자리들이 더욱 깎여나가 표면이 균일해지는 경향을 보여주지만 그와 동시에 NaNO₃ 전해질의 경우에는 점식이 발생하여 제염된 표면의 상태 및 전해제염을 통해 발생하는 이차폐기물의 측면에서 그다지 바람직한 결과를 보여주지 못할 것으로 예측된다.

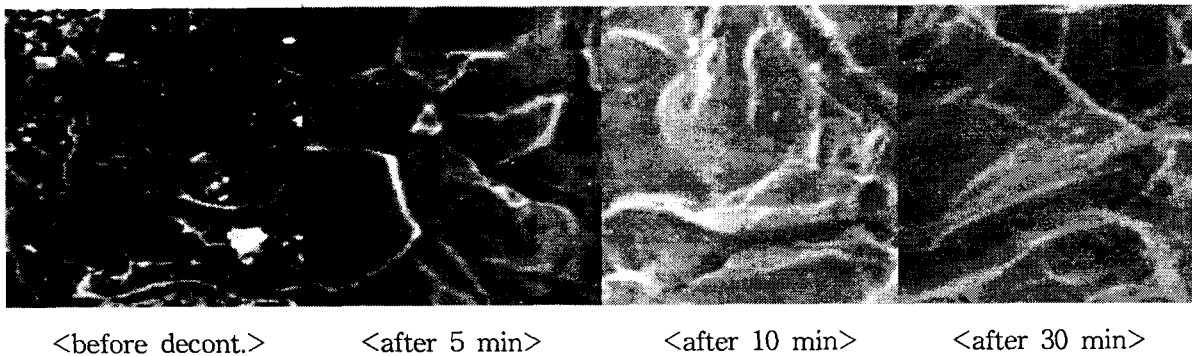


Fig. 10. SEM images of UO₂ contaminated metal surface before and after electrochemical decontamination with the variation of decontamination time using Na₂SO₄ electrolyte.

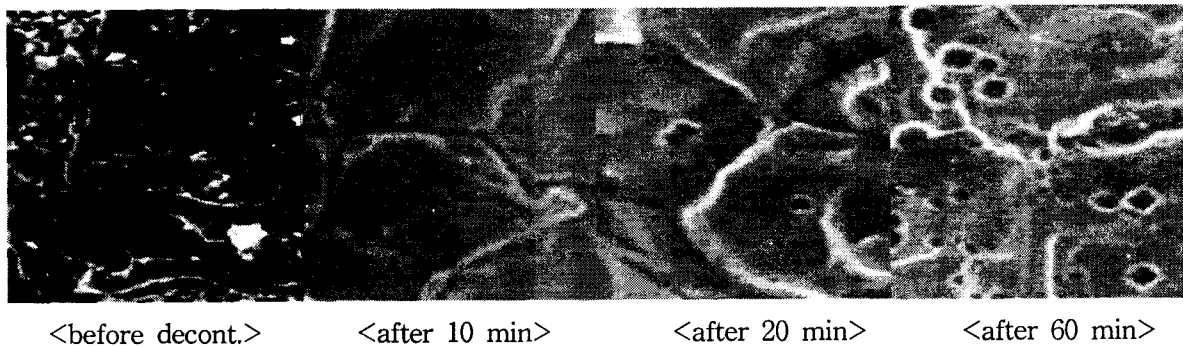


Fig. 11. SEM images of UO₂ contaminated metal surface before and after electrochemical decontamination with the variation of decontamination time using NaNO₃ electrolyte.

4. 결론

(1) 여러 가지 중성염 용액 내의 동일한 조건 하에서 SUS-304 및 Inconel-600 시편의 전해용해 시 전해용해 성능이 가장 우수한 Na₂SO₄ 및 Na₂SO₄에 비해서는 다소 성능이 떨어지지만 우라늄 변환시설의 가동이력을 고려하여 NaNO₃ 중성염 용액이 우라늄 변환시설의 해체 시 발생하는 금속폐기물의 전해제염 용액으로 적절함을 보였다.

(2) Na₂SO₄ 용액에서 SUS-304에 대한 전해용해는 전류밀도가 50 mA/cm² 이상에서,

Inconel-600에 대해서는 50 mA/cm^2 에서가 효과적인 반면에 NaNO_3 용액에 있어서는 SUS-304 시편에 대해서는 100 mA/cm^2 이하에서, Inconel-600에 대해서는 $50 \sim 100 \text{ mA/cm}^2$ 에서가 효과적이었다.

(3) Na_2SO_4 전해용액 내에서 전해용해가 진행되는 동안 금속시편의 무게감소는 농도의 변화와는 무관하였고, 시편표면 전체에 걸쳐 균일한 용해가 진행된 반면에, NaNO_3 전해용액에 있어서는 농도증가에 따라 시편의 무게감소가 증가하며, 특히 3M 이상에서는 국부부식의 증가로 무게감소의 급격한 증가와 함께 시편의 표면 거칠기가 매우 증대되므로 방사성 물질의 재 오염 가능성 및 이차폐기물의 발생량의 증가가 우려되므로 1M 이하의 농도조건에서의 전해제염이 바람직한 것으로 판단된다.

(4) 고온에서 예민화(열처리)된 SUS-304 시편의 전해용해 시 용해에 대한 재료의 민감도가 증가됨으로써 예민화 되지 않은 시편에 비하여 3배 이상 용해 성능이 증가되었으나, Inconel-600 시편의 경우에 있어서는 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

(5) 우라늄 변환시설에서 인출한 UO_2 , AUC 및 ADU 오염시편에 대하여 Na_2SO_4 용액과 NaNO_3 전해용액 내에서 100 mA/cm^2 의 전류밀도 조건으로 전해제염 실증시험을 수행한 결과 오염물의 종류 및 오염 준위의 대소와는 관계없이 모든 시편에 대하여 10분 이내의 짧은 시간 내에 자체처분 기준치 이하로 및 방사능 준위를 감소시킴으로써 본 중성염 전해제염이 매우 성공적임을 확인하였다.

참고문헌

1. J. K. Moon, S. Y. Park, C. H. Jung, J. W. Lee, and W. Z. Oh, "Radioactive Metal Waste Recycling Technology", J. Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 6, No. 4, pp.38-47 (1997).
2. T. Izumida et al., "Electrolytic Decontamination of Surfaces Contaminated Metal by Alternating Electrolysis Using Square-Wave Current in a Neutral Salt Electrolyte", Nuclear Technology, Vol.70, pp. 249-253, Aug.(1985).
3. E. L. Childs and J. L. Long, "Electrolytic Decontamination of Stainless Steel Using a Basic Electrolyte", Nuclear Technology, Vol.54, p.208(1981).
4. Allen, R. P. et al, "Electropolishing as a Decontamination Process: Progress and Application", PNL-SA-6858(1978).
5. K. Westerverg and T. Waltersten, "Eldecon-Electrochemical Decontamination in Low Temperature Neutral Electrolyte", International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 5, Vol.1, Bournemouth, UK Oct. 23-27, pp.191-195 (1989).
6. "Cleaning Up With ELDECON (Electrochemical Decontamination)", Nuclear Engineering International, Vol.34(420), pp.37-38, July(1989).
7. W. Z. Oh, J. K. Moon, C. H. Jung, and S. Y. Park, "Nuclear Fuel Cycle Waste Recycling Technology Development", KAERI/RR-1830/97 (1997).