

Performance Evaluation of Stirrers for Preventing Dendrite Growth on Liquid Cathode

액체음극에서의 금속 수지상 성장 억제를 위한 교반기 성능평가

Si-Hyung Kim¹⁾, Dal-Seong Yoon*, Young-Jae You, Seungwoo Paek,
Joon-Bo Shim and Do-Hee Ahn

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero Yuseong-gu, Daejeon

*University of Science and Technology, Eoeun-dong 52, Youseong-gu Daejeon

김시형¹⁾, 윤달성*, 유영재, 백승우, 심준보, 안도희

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

*과학기술연합대학원대학교, 대전광역시 유성구 과학로 어은동 52

(Received December 04, 2008 / Revised January 28, 2009 / Approved February 05, 2009)

Abstract

An electrolytic system (zinc anode-gallium cathode) was setup to evaluate the performance of several stirrers prepared for this study, where stirrers have been used to prevent uranium from forming dendrite on the cathode in pyrochemical process. In the case of no-stirring condition, zinc dendrites began to grow on the gallium surface in 1 hour and some dendrite grew out of the cathode crucible around 6 hours. When a rectangular stirrer or a tilt stirrer was rotated, at 40~150 rpm, to mix the liquid gallium cathode, dendritic growth of zinc metal was prevented irrespective of revolution speed, but some of the deposits overflowed out of the cathode crucible owing to the large centrifugal forces at 150 rpm. The harrow stirrer did not nearly retard the dendrite growth at 40 rpm, but the dendrite growth was retarded at higher than 100 rpm and the zinc deposits also did not overflow at 150 rpm. Pounder could also prevent the dendrite growth to some extent but it had some difficulties in operation compared with other types of stirrers.

Key words : Pyrochemical process, Dendrite, Stirrer, Gallium cathode, Electrolytic deposition

요 약

건식공정에서 우라늄 수지상의 성장을 억제하는데 사용할 교반기를 개발하기 위하여, 수용액계로 된 모의시험 장치(아연 양극 - 갈륨 음극)에서 자체 제작한 여러 가지 교반기의 성능을 평가하였다. 교반기를 사용하지 않았을 경우에는 전착 후 1 시간 내에 액체음극 표면에서 아연이 수지상으로 성장되기 시작하여 6 시간 정도면 수지상 중의 일부가 도가니 바깥으로 자라게 되었다. 사각형 또는 경사형 교반기로 액체음극을 40~150 rpm으로 교반하면 8 시간까지 아연이 수지상으로 성장되는 것을 억제할 수 있었으나, 회전수가 150 rpm으로 증가하면 전착물 중의 일부가 음극 도가니 바깥으로 흘러넘치게 되었다. 해로우형 교반기는 40 rpm에서는 수지상 성장을 억제하지 못하였으나, 100 rpm 이상에서는 수지상으로 전착되는 것을 억제할 수

1) Corresponding Author. E-mail : exodus@kaeri.re.kr

있었고, 또한 아연 전착물이 150 rpm에서도 도가니 바깥으로 흘러넘치지 않았다. 파운더 교반기는 수지상의 성장을 어느 정도 억제할 수 있었으나 전위가 불규칙하게 변화되고 운전 장치가 복잡한 것이 단점으로 나타났다.

중심단어 : 건식공정, 수지상, 교반기, 갈륨음극, 전해전착

I. 서론

원자력발전량이 증가함에 따라 누적되고 있는 사용후핵연료의 처리, 처분 문제가 현안으로 등장하고 있으며, 사용후핵연료의 부피를 감용하고 또한 자원으로 재활용하기 위해 원자력 발전소를 운영하는 많은 나라에서 습식공정[1-3] 또는 건식공정[2, 4]을 개발하고 있다. 습식공정에서는 사용후핵연료로부터 우라늄과 플루토늄이 주로 회수되며, 이 원소들은 혼합산화물 핵연료(mixed oxide)로 제조되어 경수로에서 재활용되고 있다[5, 6]. 건식공정(pyrochemical process)에서는 우라늄뿐만 아니라 초우라늄과 같은 장수명핵종 원소도 회수되어, 고속 중성자로에서 반감기가 짧은 원소로 핵종변환 되거나 금속핵연료로 사용될 수 있다.

한국원자력연구원에서 개발 중인 건식공정은 3 단계로 나누어지는데, 첫째는 사용후 산화물핵연료를 금속연료로 전환하는 전해환원 공정, 둘째는 환원된 금속연료에서 고체 핵연음을 이용하여 순수한 우라늄만 회수하는 전해정련 공정, 그리고 셋째로는 카드뮴 등과 같은 액체음극으로 전해정련 후 용융염에 남아 있는 우라늄 및 초우라늄 원소를 동시에 회수할 수 있는 전해제련 공정이다[7, 8].

고체음극에서는 우라늄과 초우라늄 원소의 전착전위 차이가 커서 우라늄만을 독립적으로 분리할 수 있지만, 액체음극에서는 전착전위가 서로 비슷하기 때문에 분리되지 않고 거의 동시에 회수된다. 그러나, 용융염에서 Pu/U 비가 3 이하인 일반적인 용융염 농도범위에서는 우라늄이 다른 악티늄족 원소보다 액체카드뮴에 먼저 전착되는 것으로 알려져 있다[9, 10]. 이때, 전해반응에 의해 회수되는 우라늄은 표면적이 큰 수지상(dendrite)을 형성하는 경향이 있어서 액체음극 아래로 가라앉지 않는다[11]. 액체음극 표면에 생성된 우라늄 수지상은 고체 전극으로 작용하게 되므로, 이후에는 우라늄만 선택적으로 회수하게 되어 초우라늄 원소의 회수를 방해할 수 있다.

따라서, 건식공정을 개발하는 각 나라에서는 우라늄이 수지상으로 성장되는 것을 최대한 억제하기 위하여 교반기를 자체적으로 개발하게 되었다[11, 12]. 예를 들어, 일본의 CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry)에서는

사각형 stirrer를 카드뮴 속에 장입하여 고속 회전함으로써 우라늄이 카드뮴 표면에서 수지상으로 성장하는 것을 억제하였으며[11], 미국의 ANL(Argon National Laboratory)에서는 직경이 음극도가니보다 약간 작은 파운더라고 부르는 원판형 교반기로 우라늄 전착물을 액체카드뮴 속으로 밀어 넣는 시험을 수행하였다[12].

본 연구에서는 수용액계로 된 모의 전해시험 장치를 이용하여 금속 수지상의 전착특성을 이해하였고[13], 또한 파운더와 stirrer 형 교반기를 자체 제작하여 그 성능을 비교 평가함으로써 수지상의 성장 억제에 적합한 교반기 형태를 제시하였다. 모의 전해시험 장치에서는, 우라늄과 카드뮴 대신 아연과 갈륨을 각각 양극과 음극 재료로 사용하였으며, 또한 용융염 대신에 황산수용액을 전해질로 사용하였다.

II. 재료와 방법

본 연구를 위하여 제작된 실험 장치는 그림 1과 같으며, 수지상의 성장/파쇄 거동을 육안으로 관찰하기 위하여 모든 용기는 투명한 아크릴로 제작되었다. 이 장치의 주요 구성품은 전해조, 음극용기, 99.5% 순도의 아연으로 된 양극(anode), 99.99%의 갈륨(Aldrich, 미국)으로 된 음극(cathode), 직경 1 mm의 백금 참조전극(reference electrode) 및 교반기 등이다. 전해조의 크기는 가로, 세로 및 높이가 각각 140×140×110 mm 이고, 이 용기 안에 1

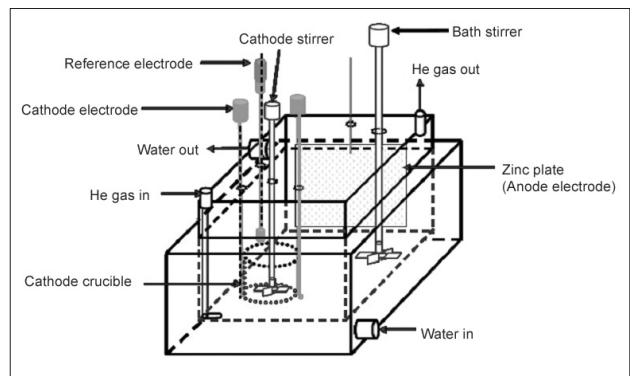


Fig. 1 Schematic diagram of zinc-gallium system.

물 또는 2 몰의 황산아연 전해질 용액이 3/4 정도 채워졌으며, 용액의 온도는 50°C로 유지되었다. 사각형 stirrer를 전해조에 설치하여 100 rpm으로 회전함으로써 전해질 용액이 균질하게 되도록 하였으며, 전착시험 2 시간 전부터 헬륨 기체를 전해질 용액 내부로 흘려주어 용존산소를 제거하였다.

음극 용기는 원통형 구조로서 내경×높이가 50×45 mm이며 용기의 2/3 정도가 갈륨으로 채워졌다. 본 연구에서 사용된 액체음극용 교반기는 그림 2에서 보는 바와 같이 stirrer형(사각, 경사, 해로우(harrow))과 파운더(pounder)형으로 되어 있으며, 각 교반기의 축과 블레이드는 전기절연을 위해 각각 산화물과 테프론으로 제작하였다. 액체음극을 교반하기 위한 stirrer형 블레이드는 길이와 높이가 각각 40×25 mm이며 40~150 rpm으로 회전되었다. 전해질과 액체음극을 동시에 교반할 수 있도록 stirrer형 교반기의 블레이드를 두 계면의 가운데 위치하도록 설치하였다. 파운더는 직경 및 두께가 각각 40×10 mm인 디스크 모양으로 되어 있으며 이 중에서 약 1/10 이 절단된 형태이다. 초기에는 액체갈륨 상부에 위치하다가 일정한 속도로 상·하 및 회전운동을 하면서 액체음극 아래로 이동한 후 다시 초기 위치로 되돌아오도록 운전하였다.

직경 1 mm의 탄탈륨 선이 갈륨 음극과 가로, 세로 및 두께가 각각 100×90×3 mm 인 아연 양극의 도선으로 사용되었다. 이때, 아연관과 도선의 연결부위가 전해질 용액 속에 잠기지 않도록 양극을 전해조의 측면에 수직으로 세워두었다. 아연을 갈륨 음극에 전착할 때 수지상이 형성되는 최적 조건을 찾기 위하여 일정전위(potentiostat)로 전류밀도를 30~100 mA/cm²까지 변화하였다. 본 연구에서 사용된 일정전위기의 최대 전류는 20 A, compliance voltage는 ±10 V 였다.

III. 결과 및 논의

우라늄 대신 사용될 양극재료는 석출 시에 수지상을 형성해야 할 뿐 아니라 액체음극보다 무겁고 또한 음극과 반응을 하지 않아야 한다. 수지상을 형성하는 것으로 알려진 재료로는 밀도가 7~9 g/cm³인 아연, 구리, 주석, 니켈, 코발트와 10~11 g/cm³인 납과 은 등이 있었다. 이 중에서, 황

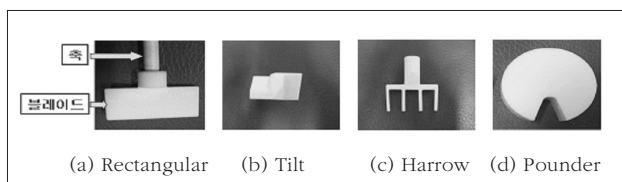


Fig. 2 Stirrer types.

산납은 불용성이고 황산은은 고가이어서 후보재료에서 제외되었고, 물에 잘 녹는 것으로 알려진 아연을 모의 양극재료로 최종 선정하였다. 음극 재료는 50°C 이하의 저온에서 액체로 되어야 하고 물과 반응을 하지 않아야 하므로 갈륨과 수은이 후보 재료로 고려되었다. 수은은 유독성이 클 뿐만 아니라 밀도가 13.5 g/cm³로서 아연보다 크기 때문에 밀도가 6 g/cm³인 갈륨을 음극재료로 최종 선정하였다.

아연 이온이 액체갈륨 음극에서 수지상으로 생성되는 최적조건을 먼저 설정한 후, 해당 조건에서 각 교반기가 수지상 성장 억제에 미치는 영향을 관찰하였다.

가. 수지상 생성조건 설정

수지상 생성의 최적조건을 설정하기 위하여 전해질 수용액 농도, 전류밀도 그리고 전해조 교반기의 회전수가 전착에 미치는 영향을 관찰하였다.

① 전해질 농도의 영향

1 몰과 2 몰의 황산아연 용액에서 30 mA/cm² 조건으로 전착시험을 수행하였으며, 이 때, 액체음극은 교반을 하지 않았다. 두 용액에서 초기 음극전위는 각각 -4.2 V와 -3.7 V로서 전해질 농도가 높을수록 저항이 작음을 알 수 있었다. 그러나, 2 몰의 황산아연 수용액은 혼탁하여 수지상의 생성을 육안으로 관찰하기에는 부적합하였으므로, 이후부터는 1 몰 황산아연 수용액에서 전착시험을 진행하였다.

② 전류밀도에 따른 전착거동

전류밀도에 따른 전착거동을 비교하기 위하여 1 몰 황산아연 수용액에서 액체음극의 전류밀도를 30~100 mA/cm²로 변화하면서 전착을 수행하였다. 이 때, 전해조 교반속도는 100 rpm, 액체음극 교반속도는 0 rpm 이었다. 70 mA/cm² 이하에서는 액체음극 위에 생성된 아연 전착물(deposits)이 수지상 형태가 아니었으며, 80 mA/cm² 이상에서 전착되었을 때 수지상 형상으로 전착되었다(그림 3). 전류밀도가 높을수록 수지상의 성장속도는 빠르게 되었으나, 일정전위기의 용량을 고려하여 이후부터는 85~95 mA/cm² 범위에서 전착시험을 수행하였다.

③ 전해조 교반속도의 영향

전류밀도 85 mA/cm² 에서, 액체음극은 교반하지 않고 전

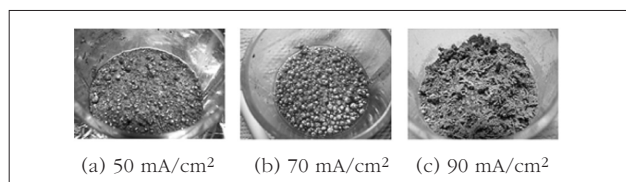


Fig. 3 Shapes of zinc deposits depending on the current densities.

해조 교반속도를 50, 100, 200 rpm으로 변화하였을 때 전착 거동을 관찰하였다(그림 4). 시간에 따른 음극전위를 비교해 보았을 때 전해조 교반속도가 전착거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었으며, 회전속도가 빠르면 난류(turbulent flow)에 의해 전해조 바닥에 침전되어 있던 아연 전착물이 부유하는 현상이 발생하므로, 이후 실험부터는 전해조 교반속도를 100 rpm으로 고정하였다.

나. 수지상 성장에 따른 음극전위의 변화

아연-갈륨 상태도에 의하면 반응온도 50°C에서 갈륨에 용해되는 아연의 용해한도(solubility limit)는 약 6 몰%이었다. 이것은 반응 초기에 전착되는 아연은 수지상을 생성하지 못하고 갈륨 내에 우선 용해됨을 의미한다. 반응시간을 단축하고 고 비용의 갈륨 사용량도 적게 하기 위하여 차후 전착시험부터는 아연이 충분히 용해되어 있는 갈륨, 즉, 기존 전착시험에 이용된 갈륨을 재활용하였다. 이 경우에는 전착되는 아연이 반응초기부터 수지상으로 생성 및 성장될 것으로 생각된다.

1 몰의 황산아연 수용액에서 액체음극을 교반하지 않은 상태로 정 전류(85 mA/cm²) 전착시험을 하였다. 전착반응이 시작되기 전에는 액체갈륨 표면에 아무 것도 존재하지 않았으나, 전착시간이 증가함에 따라서 갈륨 표면에서 아연 입자가 먼저 생성되고 이 입자들을 중심으로 수지상이 성장하였으며, 6시간이 지나면서 수지상이 음극용기 바깥까지 자라게 되었다(그림 5(a)와 그림 5(b)). 수지상은 전극역할을 하게 되므로 수지상이 성장할수록 음극전위는 그림 5(c)와 같이 감소하게 된다. 음극용기 바깥으로 성장한 수지상의 위치는 양극 방향, 특히, 전해조 교반기 방향으로 향하고 있었는데, 그 곳은 전해조 교반기에 의해 아연 이온이 가장 원활하게 전달되는 부분으로 생각된다. 전착이 계속 진행될 경우, 전해조 바깥으로 성장한 수지상의 끝(tip) 부분에서 새로운 수지상이 계속

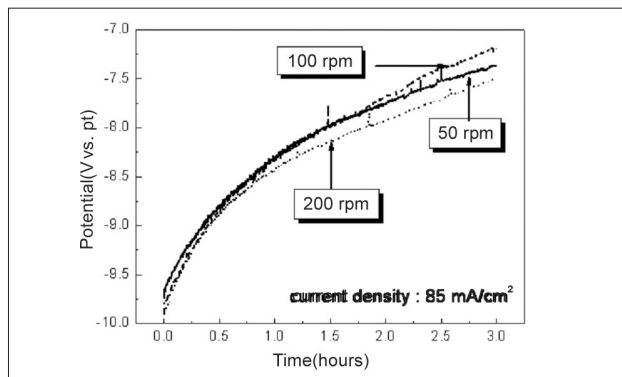


Fig. 4. Variation of cathode potentials depending on the revolution speed of electrolytic stirrer.

성장되었고, 그 중의 일부는 분리되어 전해조 바닥으로 떨어졌다. 수용액 내부에 생성된 수지상은 핀셋으로도 쉽게 함몰될 수 있을 정도로 매우 약한 결합을 하고 있었다. 그러나, 수지상을 수용액에서 건져내어 공기 중에서 건조할 경우에는, 황산아연 수용액이 접착제(bonding agent) 역할을 하여 그 형상을 견고하게 유지할 수 있었다. 이것으로 보아서, 우라늄 수지상도 LiCl-KCl 염(salt) 내부에서는 약한 결합으로 형상을 유지하고 있었을 것이나, 공기 중에서 냉각될 때는 우라늄 수지상에 묻어 있던 염이 굳어져서 단단하게 된 것으로 예상된다. 그림 5(d)는 수지상을 X-선 회절장치(XRD)로 분석한 결과로서 주성분이 아연임을 확인할 수 있었다.

다. 교반기의 종류에 따른 전착특성 비교

앞에서 언급한 바와 같이, 본 연구를 위하여 제작한 교반기는 stirrer형(사각, 경사, 해로우)과 파운더형 두 가지로 분류할 수 있으며, stirrer형은 회전(40~150 rpm)에 의해서, 파운더형은 수직 이동 및 회전에 의해서 액체음극을 교반하게 된다.

그림 6은 사각형 stirrer로 액체음극을 40~150 rpm으로 회전하였을 때 전착결과를 나타낸 것이다. 교반하지 않았을 때(0 rpm) 보다 교반을 할 때 음극전위가 더 크게 되었고, 회전 속도에 따라서도 전위의 크기가 다르게 나타났다. 사각형 stirrer로 갈륨 음극을 40 rpm으로 교반하였을 때, 음극 표면에 전착되는 아연이 수지상 형상으로 되어 있지는 않았지만 대부분의 아연 전착물이 갈륨 아래로 침전되지 않고 회전하는 stirrer의 블레이드와 함께 갈륨 표면 위로 떠다니고 있었다. 이것은 갈륨과 아연의 밀도가 각각 6.1 g/cm³ 과 7.1 g/cm³로서 그 차이가 크지 않고, 또한 아연 전착물이 갈륨과

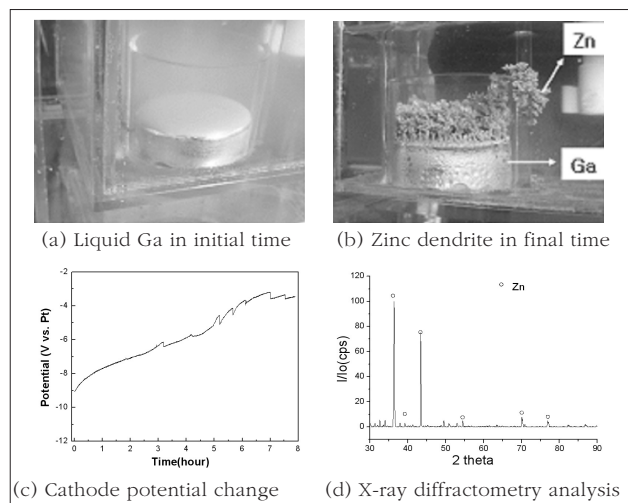


Fig. 5. Zn deposition results on the Ga cathode in the no-stirring condition.

혼합되어 있었기 때문에 판단된다. 전착이 계속 진행되면서 아연 전착물의 크기와 수는 늘어나게 되고 이로 인해 여러 개의 전착물이 상호 간에 또는 음극 용기의 내벽과 충돌됨으로 인해 크기가 작은 전착물로 파쇄 되었다(그림 6(b)).

회전속도가 80 rpm으로 증가하게 되면 원심력으로 인하여 아연 전착물이 음극용기 내벽 쪽으로 밀려나게 되고, 이로 인해 전착물이 병풍처럼 수직으로 성장되기도 하였다(그림 6(c)). 성장하던 전착물은 일정 높이가 되었을 때 교반기 방향으로 기울어지게 되었고, 이 때 회전하던 stirrer의 블레이드에 부딪혀 파쇄 되는 거동을 보여 주었으며, 이러한 과정으로 인해 그림 6(a)에 나타난 것처럼 봉우리(peak) 형태의 전위 모양이 나타났다.

150 rpm으로 회전속도가 증가되었을 때는, 음극 용기 내벽에 누적되던 아연 전착물이 용기 바깥으로 흘러넘치는 현상도 관찰되었다. 이로 인해 액체갈륨과 아연 전착물의 양이 줄어들어 저 회전속도에서 보다 음극전위가 더 높아지게 되었다. 블레이드의 길이를 적절히 조절하면 파쇄효과가 감소되지 않으면서 전착물이 흘러넘치는 현상도 방지할 수 있을 것이다.

사각형 stirrer로 교반을 하면 아연이 수지상으로 전착되지는 않았지만, 대부분의 아연 전착물이 갈륨 표면 위를 부유하는 경향이 관찰되었다. 전착물이 갈륨 속으로 더 많이 침전할 수 있도록 가압 효과를 주기 위하여 그림 2(b)의 경사형 stirrer를 이용하여 전착시험을 수행하였다. 결과적으로, 가압 효과는 크지 않았으며 사각형 stirrer와 비슷한 전착 거동을 보여주었다.

그림 7은 해로우형 stirrer를 사용하였을 때의 전착시험 결

과이다. 40 rpm에서는 수지상으로 성장되는 것을 2시간 이상 억제하지 못하였고, 6시간이 경과되면 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 수지상이 음극 표면 전체로 성장하였다. 반면에, 회전수가 100 rpm 이상으로 증가하면 전착시간 6시간까지 수지상으로 성장되는 것을 억제할 수 있었고, 뿐만 아니라, 150 rpm에서도 전착물이 음극도가나 바깥으로 넘치지 않았다(그림 7(b)). 그러므로, 수지상을 파쇄 및 억제하는 데에는 해로우형 블레이드가 사각형 또는 경사형 보다 더 효과적일 것으로 생각된다.

파운더는 그림 2(d)에서 보는 바와 같이 1/10 정도가 절단된 디스크 형태로 되어 있으며, 전착 시험 결과는 그림 8에 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이, 전해질 내에서 생성된 아연 수지상은 약간의 압력에 의해서도 그 형상을 유지하지 못하고 쉽게 부수어진다. 따라서, 파운더를 아래로 이동하여 아연 전착물을 음극 아래까지 눌러준 후 음극 속에서 회전시켜 주면, 아연 전착물은 액체음극 내부에서 분산될 수 있을 것으로 예측된다. 수직 이동에 의해서 파운더가 액체음극 표면을 누르게 되면 음극면적이 크게 변화하게 되고, 그에 따라서 음극전위의 값도 크게 변화하였다(그림 8). 이 진동 폭을 적게 하려면 수직 행정거리를 최소화하도록 운전 조건을 설정해야 한다. LiCl-KCl-UCl₃와 같이 육안으로 내부를 관찰할 수 없는 용액에서, 그리고, 전착이 진행되어 액체음극의 높이가 변하는 경우에는, 행정거리 설정이 매우 어려워져 음극전위의 진동 폭이 상당히 크게 될 것으로 보인다. 그리고, 회전 및 수직 이동을 위해서는 복잡한 운전 장치가 필요한 것도 파운더 교반기의 단점이다.

우라늄의 밀도는 약 19 g/cm³로서 카드뮴의 7.8 g/cm³ 보

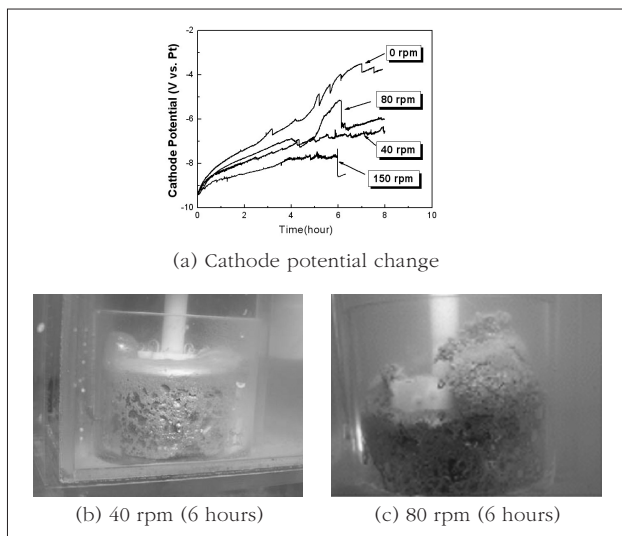


Fig. 6. The schematic of concrete waste

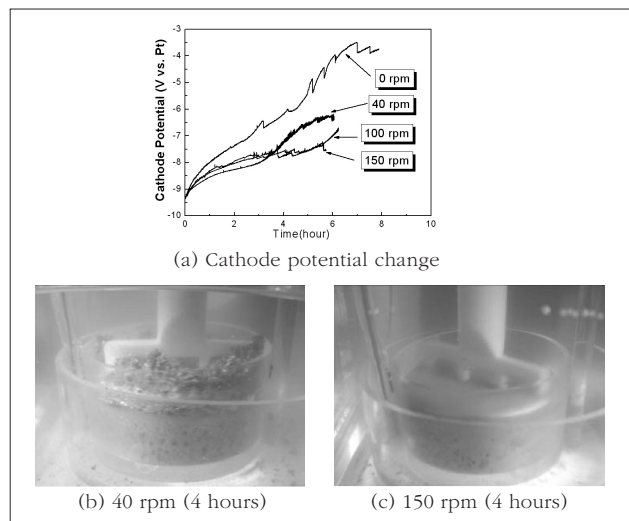


Fig. 7 Changes of cathode potentials and zinc deposit shapes in the case of a harrow stirrer.

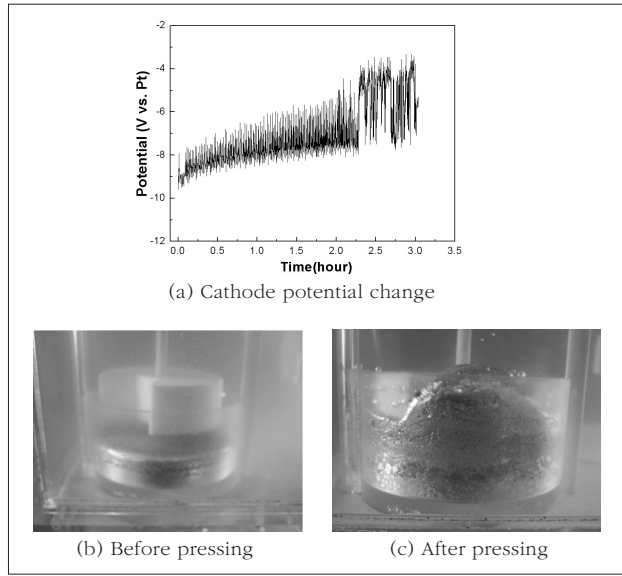


Fig. 8 Changes of cathode potentials and zinc deposit shapes in the case of a pounder.

다 2 배 이상 크기 때문에, 교반에 의해 우라늄 수지상이 크기가 작은 입자로 분산되면 카드뮴 아래로 침전될 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구를 통하여 축적된 교반기의 운용에 대한 지식을 향후 우라늄 수지상의 성장억제에 적합한 교반기를 개발하는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결론

전해반응을 이용하여 액체갈륨 음극에서의 아연 전착거동을 관찰한 결과, 수지상 성장 등과 같은 전극 반응은 음극 전위의 변화를 동반함을 알 수 있었다. 85 mA/cm² 이상의 전류 밀도에서 아연이 갈륨 표면에 수지상으로 성장되는 것을 확인하였으며, 전해질 용액 속에 있는 수지상은 강도가 약하여 핀셋으로도 그 형상이 쉽게 변형되었다. 교반기의 성능을 수지상으로의 전착 여부와 교반에 따른 전위의 안정성 그리고 장치 제작의 간편성 등으로 평가하였다. 사각형 또는 경사형 stirrer를 이용하여 40~150 rpm의 회전수로 액체음극을 교반하면 아연이 수지상으로 전착되는 것을 억제할 수 있었으나, 회전수가 커지면 액체음극과 전착물 중의 일부가 도가니 바깥으로 넘치는 현상이 발생되었다. 해로우형 stirrer로 40 rpm에서 액체음극을 교반하면 아연이 수지상으로 성장되는 것을 방지하지 못하였으나, 100 rpm 이상에서는 수지상으로 전착되는 것을 억제할 수 있었고, 뿐만 아니라 전착물이 음극용기 바깥으로 넘치지도 않았다. 파운더도 수지상의 성장을 어느 정도 억제할 수 있었으나, 전위가 불규칙하게 변화되고 운전

장치가 복잡한 것이 단점으로 나타났다. 본 연구결과를 이용하여 향후 건식공정에서 우라늄 수지상 억제에 적합한 교반기 개발을 계획한다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. J. Laidler, "Advanced Spent Fuel Processing Technologies for the United States GNEP Programme", 9th Information and Exchange Meeting on Actinide and Fission Products Partitioning and Transmutation, pp. 151-159, Nimes, France (2006).
- [2] O.H. Zabunoglu and L. Ozdemir, "Purex Co-processing of Spent LWR Fuels: Flow Sheet", Annals of Nuclear Energy, vol. 32, pp. 151-162 (2005).
- [3] H. Funasaka, T. Namba, Y. Nagaoki, T. Tsukada, K. Shiba and Y. Sagayama, "Prospects and Progress Status of the Advanced Fuel Cycle System in Japan", Atalante 2004 International Conference, O11-03, Nimes, France (2004).
- [4] S. Vavilov, T. Kobayashi and M. Myochin, "Principle and Test Experience of the RIAR's Oxide Pyroprocess", J. Nucl. Sci. and Tech., 41(10), pp. 1018-1025 (2004).
- [5] C.T. Walker, W. Goll and T. Matsumura, "Further Observation on OCOM MOX Fuel : Microstructure in the Vicinity of the Pellet Rim and Fuel-Cladding Interaction", J. Nucl. Mater., 245, pp.169-178 (1997).
- [6] H. Roepenack, F.U. Schlemmer and G. J. Schlosser, "Development of Thermal Plutonium Recycling", Nucl. Tech., 77(2), pp. 175-186 (1987).
- [7] 유재형, 이병직, 이한수, 김응호, "고온전해분리 기술의 개요 및 기존 핵연료주기 대체 기술로서의 적합성 검토", 방사성폐기물 학회지, 5(4), pp. 283-295 (2007).
- [8] 박성빈, 서중석, 강대승, 권성길, 박성원, "LiCl-Li₂O 용

- 용염에서 일체형 음극전극을 사용한 우라늄 산화물의 전해환원에 대한 연구”, 방사성폐기물학회지, 3(2), pp. 105-112 (2005).
- [9] T. Kato, T. Inoue, T. Iwai and Y. Arai, "Separation Behaviors of Actinides from Rare Earths in Molten Salt Electrorefining Using Saturated Liquid Cadmium Cathode", J. Nucl. Mater., 357, pp. 105-114 (2006).
- [10] K. Kinoshita, T. Inoue, S.P. Fusselman, D.L. Grimmer, J.J. Roy, R.L. Gay, C.L. Krueger, C.R. Nabelek and T.S. Storvick, "Separation of U and TRU Elements from Rare Earth Elements by Means of Multistage Extraction in LiCl-KCl/Bi System", J. Nucl. Sci. Tech., 36(2), pp. 189-197 (1999).
- [11] T. Koyama, M. Iijuka, Y. Shoji, R. Fujita, H. Tanaka, T. Kobayashi and M. Tokiwai, "An Experimental Study of Molten Salt Electrorefining of Uranium Using Solid Iron Cathode and Liquid Cadmium Cathode for Development of Pyrometallurgical Reprocessing", J. Nucl. Sci. Tech., 34(4), pp. 384-393 (1997).
- [12] J.E. Battles, K.M. Myles, J.J. Laidler and D.W. Green, "Integral Fast Reactor Pyrochemical Process", Argonne National Laboratory Technical Report 1993, ANL-94/15 (1994).
- [13] N. Kondo, T. Koyama, M. Iizuka and H. Tanaka, "액상 카드뮴 음극에서의 수지상 우라늄 발생 억제 조건에 대한 연구검토", CRIEPI Report, T95029 (1996).