

사용후핵연료 처리를 위한 복극 배열 전해정전기 3차원 전산해석 및 전착거동 예측

김승현, 이종현, 박성빈*, 이성재*, 김정국*, 이한수*

충남대학교 녹색에너지기술전문대학원, 대전광역시 유성구 대학로79

*한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

ilbtheone@cnu.ac.kr

1. 서론

파이로 공정(pyroprocessing)은 핵확산저항성이 있는 기술로서 기존 습식 방법보다 경제성 및 생산성이 높으므로 우리나라와 같은 후행핵연료주기 개발의 후발 국가로서는 매우 적합한 기술이다. 그러나 고농도 핵분열물질 및 방사능을 수반하여 개발에 있어 bottleneck이 존재한다. 따라서 보다 체계적인 개발을 위하여 기존의 실험적 연구는 물론 전산 모형을 이용한 개발 방향 모색이 매우 필요하다. 고온 용융 전해 분리공정의 전산 모형은 많은 수의 화학원소들이 급격한 고온 전기화학반응을 일으키며, 금속 이온의 전착 문제를 다루어야 하므로 수치해석학적으로 매우 복잡한 문제에 해당하여 현재까지 신뢰성 있는 모형 개발이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 복극 배열 전해정전기 공정 시 전류밀도 및 최적의 전기장 분포를 해석하기 위한 모델 수립을 목적으로 하며 또한 복극 배열 전해정전기 반응기의 작동 공정을 3차원 전산해석으로 분석하여 향후 기술 개발방향과 scale-up에 대비한 기초 데이터를 설정하는데 기여한다. 기존 공학규모 전해정전기 전산해석에 사용되어 실제 실험값과의 비교를 통하여 신뢰성이 입증된 컴퓨터 코드 (Comsol4.3 Electrodeposition modules)를 적용시켰으며 3차원의 미세 격자 구조의 효율적인 해석을 위하여 슈퍼 컴퓨터급의 워크스테이션을 이용하였다. 이를 바탕으로 복극 배열 전해정전기의 최적 구조 설계를 위한 전기수력학적 전산해석과 우라늄의 전착거동에 대한 결과를 도출하였다.

2. 본론

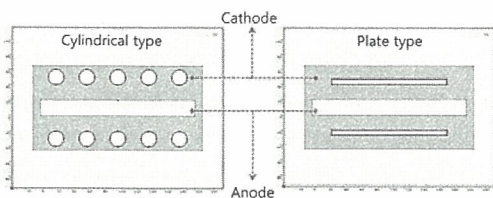


Fig. 1. cylindrical, plate 타입의 복극 전해정전기 형상.

2.1 실험방법

복극 배열 전해정전기 3차원 전산 해석을 위하여 Fig. 1과 같이 고정된 양극, 음극 형상을 제시하였으며 cylindrical, plate type의 복극 배열 전해정전기에 대한 해석이 이루어졌다. 전극표면에서의 전극반응은 전하 이동 과정이 속도를 결정하는 경우의 전극 전위(과전압)와 전류 밀도의 관계를 나타내는 전기화학계의 반응속도론으로 일반화된 Butler-Volmer 전극 반응식을 이용하였고 전극 표면에서의 농도 분극을 이 식에 커플링 시켜 최종적으로 농도 과전압이 고려된 local current density를 알아 낼 수 있었으며 계산에 사용된 경제조건 및 Uranium물성값은 Table 1.에 나타내었다.

$$I_i = I_{0,i} \left[C_R \exp \left\{ -\frac{\alpha_i n_i F}{RT} \eta_i \right\} - C_o \exp \left\{ \frac{(1-\alpha_i) n_i F}{RT} \eta_i \right\} \right]$$

Table 1. 경제조건 및 Uranium 물성값.

경제조건 및 Uranium 물성값					
생산계수	이동도	Anodic transfer coefficient	cathodic transfer coefficient	교반 속도	Uranium 전착물 밀도
1e-9 m ³ /s	1e-13 s·mol/kg	0.5	0.5	X축 : 0.02m/s Y축 : 150mA/cm ² Z축 : 0.02m/s	10, 100, 150mA/cm ² 2000kg/m ³

2.2 실험결과

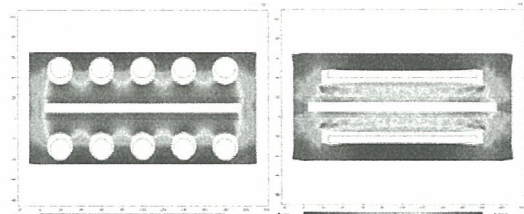


Fig. 2. 음극 형상에 따른 전류밀도 분포 해석.

Fig. 2는 정전류(150mA/cm²)조건에서 5시간 계산시 전류밀도 분포를 나타내며 두 조건 모두 음극 길이는 628.3mm로 동일하게 적용시켰다. cylindrical타입의 경우 전체적으로 비교적 균일한 전류밀도 분포를 나타내었으며 plate타입의 경우 양극과 음극 사이에서 균일성이 더 높게 나타났다. 또한 음극 양 끝단에서의 모서리 효과

로 높은 전류밀도 분포를 나타낸다. 이러한 음극 형상에 따른 균일도는 Fig. 3에 나타내었다.

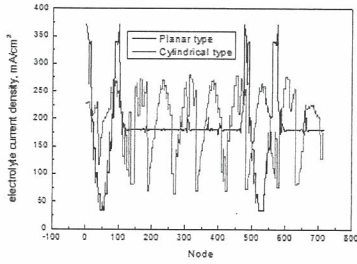


Fig. 3. 음극 형상에 따른 전류밀도 분포 균일도.

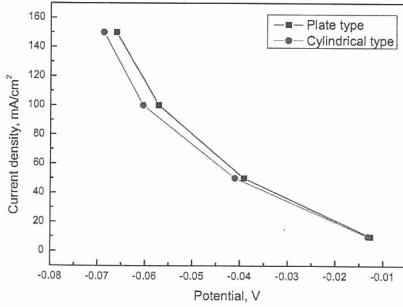


Fig. 4. 음극 형상에 따른 전류-전위 곡선.

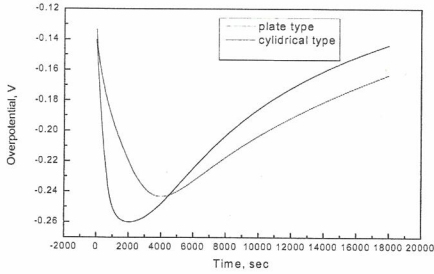


Fig. 5. 음극 형상에 따른 과전압-시간 곡선.

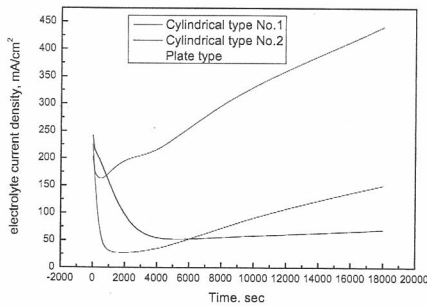


Fig. 6. 음극 형상에 따른 전류밀도-시간 곡선.

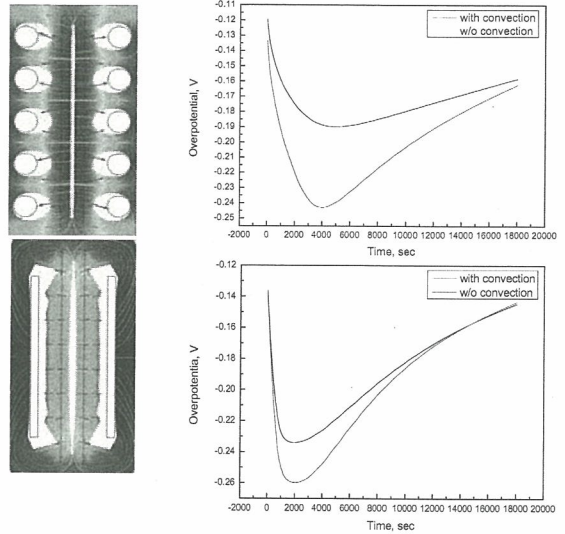


Fig. 7. 음극 형상별 교반효과에 따른 과전압 비교.

음극 형상에 따라 위와 같은 전기화학적 분석에 따른 분석을 수행하였으며 전류-전위 곡선의 경우 palte타입이 더욱 anodic한 경향을 나타냈으며 시간에 따른 과전압은 초기에는 palte타입이 과전압이 크지만 시간이 지남에 따라 감소량은 더욱 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 교반효과에 따른 과전압의 경우 cylindrical타입이 plate타입에 비해 교반의 영향에 의해 과전압이 크게 감소하는 것을 알 수 있으며 이러한 원인은 봉형의 음극 사이에 와류가 발생하여 과전압이 효과적으로 감소된 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 복극 배열 전해정련기에 대한 전산 해석으로 다양한 형상에 따른 전기화학적 해석이 이루어졌으며 이를 통하여 효율적인 전극 형상에 대한 예측이 가능하다.

4. 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 원자력연구개발사업의 기금을 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

[1] James L. Willit, Mark A, Williamson. High-throughput electrorefiner for recovery of U and U/TRU product from spent fuel. Patent Application Publication (2011).