

파이로 핫셀 유동 및 열전달 특성평가

문성인, 조일제, 유길성, 정원명, 이은표, 홍동희, 이원경, 구정희, 이호희, 김호동
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
 simoon21c@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로공정은 사용후핵연료를 처리하여 재활용하는 것을 목적으로 개발된 공정기술 중 하나로서 고준위 방사성물질을 취급하기 위해서는 차폐공간, 원격운전 및 유지보수 장치, 환기설비 등의 부대시설을 갖춘 핫셀이 필요하다. 파이로 공정시험은 공정 특성상 대부분의 공정이 불활성 분위기(inert atmosphere) 하에서 수행되어야 하며, 방사성물질의 외부 확산을 방지하기 위해 셀 내부는 항상 일정한 부압(negative pressure)으로 유지되어야 한다. 셀 내부의 압력유지를 위해서는 셀 내부에 위치한 공정장치, 조명장치 등으로부터 발생하는 열에 대한 효율적 관리가 필수적이다. 이를 위해 불활성 분위기 핫셀은 일반적으로 순환 및 냉각 시스템을 갖추고 있으나 보다 효율적인 운영을 위해 셀 내 열유동 특성을 고려한 설계가 요구된다.

본 연구의 목적은 전산유체해석을 통해 파이로 핫셀의 유동 및 열전달 성능을 향상시키기 위한 설계 방안을 도출하는 것이다. 이를 위해 현재 건설 중인 파이로 일관공정 시험시설(PRIDE: PyRoprocess Integrated DEmonstration facility)을 대상으로 불활성 분위기 셀 내의 유동특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 불활성기체 유입배관의 형상 및 분출각을 변수로하여 최적화해석을 수행하였다.

2. 본론

PRIDE는 감손우라늄(depleted uranium)을 사용하여 현재 개발된 파이로 단위공정 간의 연계성, 원격운전 및 유지보수 효율성, 시설운영에 따른 안전성 등을 확인하기 위한 시험시설이다. PRIDE 셀은 체적이 약 1,200m³(길이 40.3m, 폭 4.8m, 높이 6.4m)이며, 불활성 기체로서 아르곤(argon)을 사용한다. 정상운전시 셀 내부압력은 -10~-200mmAq, 셀 내부온도는 25~40℃이며, 압력 및 온도 유지를 위해 아르곤 순환/냉각시스템 및 배출시스템을 갖추고 있다. 그러나 이들은 아르곤 셀과 셀 운영을 위한 시스템의 전체적인 관점에 초점이 맞추어져 설계되어 있기 때문에 보다

효율적인 핫셀 설계를 위해서는 셀 내부의 열유동 특성에 초점을 맞춘 국부적인 설계가 필요하다. Fig. 1은 PRIDE 정상운전시 아르곤기체 흐름을 개략적으로 나타낸 것이다. 일반적으로 핫셀은 셀 내에 존재하는 방사성 오염물질이 부유하는 것을 방지하기 위해 상부에서 하부로 기체의 흐름이 형성되도록 설계되어야 한다. 또한 효율적인 셀 운영을 위해 정체된 구역(dead zone)없이 고른 유동특성을 보이도록 설계되어야 한다. 이를 위해 전산유체해석기법 등을 활용한 셀 내 유동해석을 수행하였다.

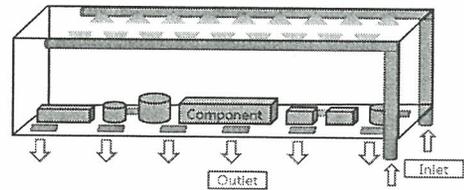


Fig. 1. Schematic diagram of argon flow.

2.1 아르곤 유입덕트 최적화

Fig. 2에 나타난 아르곤 유입덕트의 각 홀에서 그 위치에 따른 압력차에 의해 셀 내 아르곤 유입량의 차이가 발생된다[1]. 셀 내 아르곤의 고른 분포(even distribution)를 위해서는 아르곤 유입덕트의 홀 사이즈를 최적화하여 유출유량이 동일하도록 설계해야 한다. 본 연구에서는 다구찌 방법을 이용한 DFSS(design for six sigma) 기법과 전산유체해석기법을 이용하여 홀 사이즈를 최적화하였다. 최적화를 위해 제어인자로는 10번 홀 직경(Fig. 2), 10번 홀을 기준으로 한 직경의 증가량, 유출구의 절곡길이를 선정하였으며, 각각의 사례해석을 위해 Cradle사의 상용해석프로그램인 SC/Tetra version 8.0[2]을 사용하였다. 해석시 유입구는 1, 2, 3kg/s의 유량유입, 유출구는 대기압 조건으로 가정하였다.

Fig. 3은 최적화 전, 후의 각 홀에서의 질량유량을 나타낸 것이다. 초기설계안(base model)에서 1차 최적화 후(1st optimized model), 각 홀 유출량의 표준편차는 0.414에서 0.123로 약 300% 향상

되었으며, 2차 최적화 후(2nd optimized model)에도 0.123에서 0.04로 약 300% 향상되었다.

2.2 아르곤 셀 열유동 해석

아르곤 분출각이 셀 내 온도분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 아르곤 분출각도를 변수(0°, 30°, 45°, 60°)로 사례해석을 수행하였다. 해석시 전술한 최적화된 아르곤 유입덕트를 사용하였으며, 유입유량은 3kg/s, 유출구는 대기압조건, 아르곤의 온도는 25°C, 공정장치의 표면온도는 최대 100°C로 가정하였다.

Fig. 4는 최적화 전, 후의 아르곤 유입덕트를 적용한 경우에 대한 해석결과를 나타낸 것으로서 최적화된 모델을 적용할 경우, 아르곤 셀 내 유동이 전체적으로 고르게 잘 발달되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 아르곤 분출각에 따른 출구측 평균온도를 나타낸 것이다. 45° 이하에서는 아르곤 분출각이 증가함에 따라 출구측의 온도가 비례적으로 증가하지만, 45° 이후에는 그 변화가 미미한 것으로 계산되었다. 출구측의 온도가 높을수록 셀 내에서 발생한 열이 효율적으로 배출되는 것이므로 열유동 측면에서 보다 좋은 설계안이라고 할 수 있다. 따라서 PRIDE 아르곤 셀의 경우 분출각을 45°C 또는 60°C로 할 때 열유동 측면에서 보다 향상된 효율을 보인다고 할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 PRIDE 아르곤 셀을 이용하여 설계인자로 고려된 유입덕트의 형상 및 분출각이 셀내 유동 및 열전달 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 향후 본 연구에서 검토한 설계인자들을 고려하여 파이로 핫셀 설계시 열유동 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 기타 설계인자들에 대한 추가적인 검토도 필요할 것으로 판단된다.

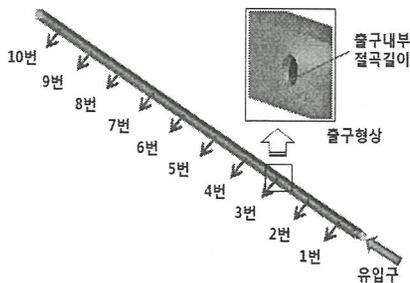


Fig. 2. Perforated duct geometry.

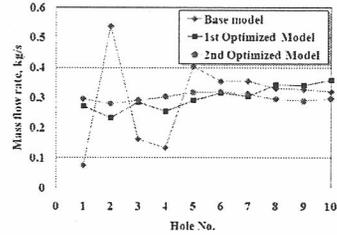
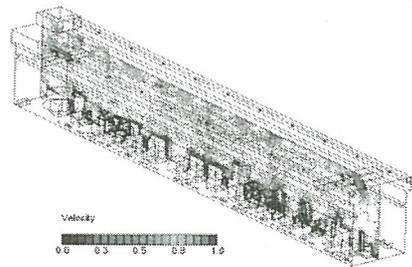
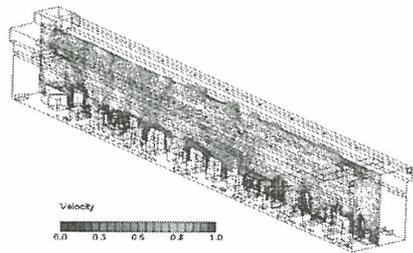


Fig. 3. Mass flow rate at each hole.



(a) Base model



(2) Optimized model

Fig. 4. Argon flow velocity distribution.

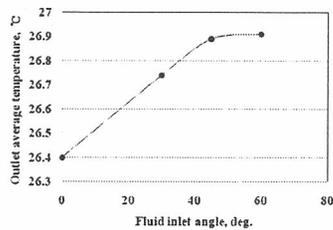


Fig. 5. Effect of argon inlet angle.

4. 참고문헌

[1] R. K. Singh, A. R. Rao, Simplified Theory for Flow Pattern Prediction in Perforated Tubes, Nuclear Engineering and Design, 239 (2009) 1725-1732.
 [2] Software Cradle co., SC/Tetra User's Guide (2009).