

정상조건에서의 콘크리트 건식 저장용기 자연대류 유동 해석

강경욱*, 김형진, 조천형

한국원자력환경공단 기술연구소, 대전광역시 유성구 가정로 168

*kku@korad.or.kr

1. 서론

콘크리트 저장용기는 사용후핵연료에서 발생한 붕괴열을 자연대류에 의해 외부로 제거하도록 피동 열제거시스템이 설계되어 있다. 피동열제거시스템은 크게 오버팩 상하부에 수평의 공기 입·출구 덕트와 캐니스터가 안착되면서 생긴 수직 환형유로로 구성된다. 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동은 유로 표면에 설치된 다소 복잡한 형상의 구조물에 의해 다양한 유동이 발생한다.

본 연구에서는 전산유체역학코드인 FLUENT를 활용하여 콘크리트 저장용기에서 발생하는 자연대류 유동현상을 분석하였다.

2. 저장용기 및 유로 형상

Fig. 1은 해석에 활용한 모델이며 콘크리트 저장용기의 전체적인 형상과 공기유로를 구성하는 T형 채널과 방사형 구조물을 나타낸다. 실린더 형태로 단순화한 연료영역을 제외하고 나머지 구조물은 실

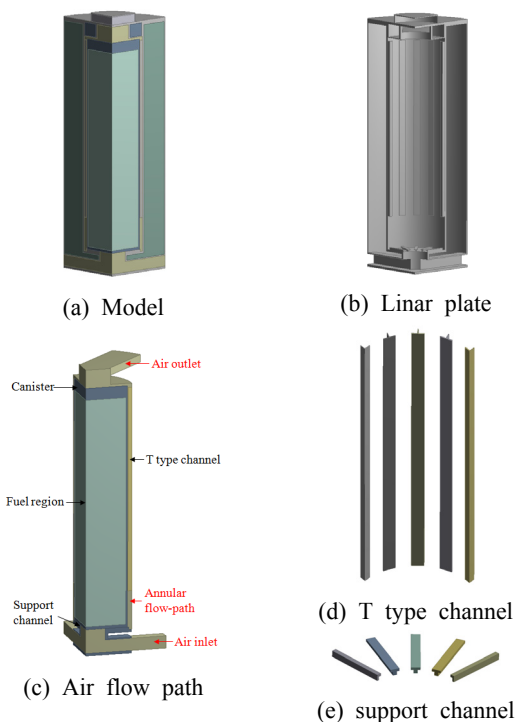


Fig. 1. Configuration on concrete storage cask.

제 도면과 일치하도록 모델링을 하였다. 하부에는 입구에서 유입된 공기가 적절히 배분되도록 16개의 방사형 구조물이 22° 간격으로 부착되어 있고 마찬가지로 측면 벽에도 16개의 T형 채널이 동일한 위치에 부착된다. 캐니스터는 오버팩과 일정한 간격을 유지하여 방사형 구조물 위에 안착되며 T형 채널의 평면벽(-)과 맞닿지 않는다. 입구 덕트에서 들어온 외부 공기가 환형유로를 따라 상승하여 출구로 원활하게 흐를 수 있도록 하부 및 상부 중앙에 원형유로가 설계되어 있다. 즉, 공기유로는 공기 입·출구, 환형유로 및 각관, 내부 표면의 구조물들로 인해 복잡한 구조이다.

3. 해석방법

공기입구가 100% 열린 정상조건에 대한 저장용기 열해석을 위해 ANSYS DesignModeler와 Meshing 프로그램을 활용해 3차원 1/4 축대칭 모델을 구성하였다. 공기유로의 모든 벽면에 조밀한 격자를 생성하였다. 난류모델은 재순환 영역, 박리, 압력 변형이 큰 유동 예측에 적합한 k-ε 계열인 Realizable k-ε 모델을 사용하였고 Near-Wall Treatment는 복잡한 유동예측이 가능한 Standard wall function을 채택하였다. 복사 열전달 모델은 Discrete Ordinates 모델을 이용하고 태양열에 의한 복사량은 고려하지 않았다. 공기 입·출구에 Pressure inlet과 Pressure outlet을 설정하였다. 용기표면과 외부환경과의 대류를 고려하기 위해 대류열전달계수(h) 5W/m²K 값을 임의로 설정하였다. 원형의 1/4 형상과 연료집합체의 부피로 나누어 계산한 연료영역에서 발생하는 열량은 1,758.5 W/m³이다. Pressure-velocity coupling은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 Momentum, Energy 및 Turbulence 항은 Second order upwind를 Pressure 항은 고부력 유동에 적합한 Body force weighted를 적용하였다.

4. 결과

Fig. 2는 유로내 유동분포이다. 입구근처 유체는

온도가 낮아 부력이 충분하지 않지만 캐니스터 근처 유체가 부력을 지속적으로 받아 상승하기 때문에 빨려 들어온다. 그리고 방사형 구조물 사이를 균일하게 통과하고 이 영역에서 최대속도를 갖는다. 환형유로의 하단으로 들어온 유체는 굴뚝효과에 의해 상단으로 올라갈수록 가속된다. 이 유동은 상단의 벽에 가로 막히게 되고 좁은 통로를 통과하면서 속도가 빨라지다가 상부의 원형유로에 접어들면서 속도가 감소한다.

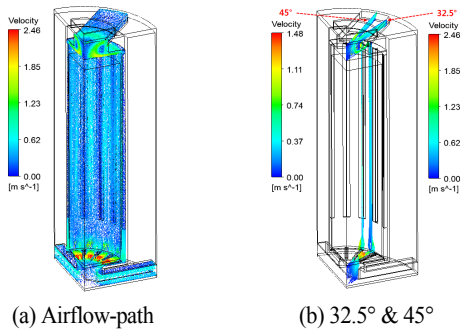


Fig. 2. Velocity distribution in airflow path.

Fig. 3의 (a)~(f)는 환형유로에서 높이별 속도분포이다. 안쪽이 캐니스터 외벽이고 바깥쪽이 오버팩 내벽이다. 0.6 m의 경우, 속도가 빠른 유동이 오버팩 근처에 밀집된다. 이 영역은 방사형 구조물 사이를 통과한 유동이 모이는 지점이므로 속도가 빠르다. 특이한 점은 높이 1 m에서 T형 채널이 없음에도 불구하고 방사형 구조물을 통과한 유동이 모양을 그대로 유지했고 플룸도 희미하게 생성되었다. 유동이 상부로 발달할수록 T형 채널 사이로 플룸의 모양이 점점 뚜렷해 졌다.

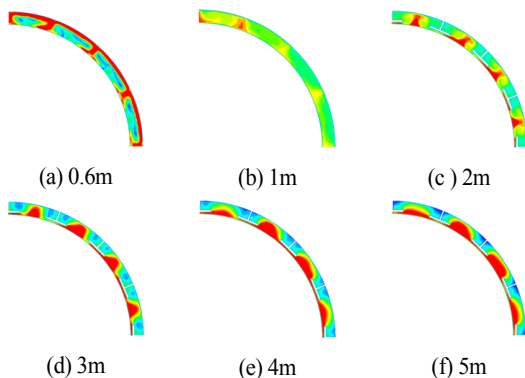


Fig. 3. Velocity contour on heights in annular flow path.

Fig. 4는 환형유로에서 수직단면에 대한 속도분포이다. 속도분포의 경우 0.8 m의 높이까지 유체의 속도는 오버팩 근처에서가 빠르고 높이가 낮아

질수록 속도는 증가했다. 1 m 높이에서 양쪽 벽면 근처에서의 속도는 거의 비슷했고 그 이상부터는 캐니스터 근처에서의 속도가 오버팩 근처의 속도를 앞질러 전형적인 자연대류 유동패턴이 나타나는 것을 확인하였다.

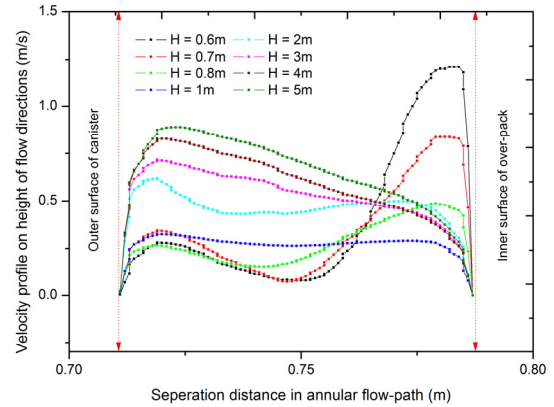


Fig. 4. Velocity profile in airflow path.

5. 결론

본 연구에서는 FLUENT를 활용하여 콘크리트 저장용기의 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동현상을 다양한 측면에서 분석하였다. 환형유로에서 최대속도의 발생위치는 방사형 구조물과 T형 채널, 그리고 유로면적에 따라 달라졌다. 공기입구를 통해 들어온 유동은 방사형 구조물 사이를 통과하면서 속도가 가장 빨랐다. 본 논문에서 기술한 현상은 콘크리트 저장용기의 피동열제거시스템에서 발생하는 유동패턴에 대해 이해하고 향후 보다 효율적인 피동열제거시스템을 설계하는데 있어서 공기유로를 구성하는 이론적 근거로 활용될 것이다.

6. 참고문헌

- [1] ANSYS FLUENT user'guide, 2015.
- [2] U.S NRC, Standard review plan for spent fuel dry cask storage systems at a general license facility, Rev. 1, 2010.