

FLUENT를 활용한 콘크리트 저장용기의 공기유로내 유속에 따른 대류열전달 해석

강경욱*, 김형진, 조천형

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168

*kku@korad.or.kr

1. 서론

콘크리트 저장용기는 원통형의 콘크리트 오버팩과 금속 캐니스터로 구성되고 오버팩의 상하부에 공기 입출구가 설치되어 자연대류에 의해 사용후핵연료에서 발생한 붕괴열이 제거된다. 캐니스터는 오버팩 내벽과 일정한 간격을 유지하면서 안착되어 유동이 지나가는 유로를 형성한다. 공기입구로 들어온 유동은 캐니스터 외벽과 오버팩 측면벽을 따라 상승하면서 경계층이 발달하고 두 경계층간의 간섭으로 환형관내 유동으로 바뀐다. 이 유동은 다시 수평관을 따라 출구 쪽으로 빠져나가게 된다. 따라서 공기유로에서는 다소 복잡한 대류열전달 현상이 발생한다. 한편, 입구로 들어오는 유속이 증가하여 환형관 내부에서 발생하는 자연대류에 초기 속도를 가해줄 경우 대류열전달 현상이 달라진다.

본 연구에서는 한국원자력환경공단에서 개발 중인 콘크리트 저장용기를 대상으로 FLUENT 전산코드를 활용하여 공기입구의 유속변화에 따른 유로내 대류열전달 현상을 조사하였다.

2. FLUENT 해석조건

2.1 해석형상 및 격자

Fig. 1은 DesignModeler 프로그램을 활용한 저장용기내 대류열전달 해석형상 및 격자를 나타낸다. 3차원, 1/4 대칭모델이며 캐니스터내 핵연료집합체 영역은 원통형의 열원으로 단순화하고 나머지 영역은 실제모델과 동일하다. 오버팩은 높이 6,030 mm, 직경 3,266 mm의 원통형이다. 공기입구는 250 × 384 mm이고 출구는 150 × 640 mm이다. 오버팩의 측면벽과 캐니스터 외벽간의 이격거리는 약 90 mm로 환형관 구조이다. 오버팩내 상하부 중앙에 직경이 각각 1,000 mm 및 800 mm의 채널은 공기입출구와 환형관에서 발생하는 유동이 원활하게 흐를 수 있게 통로역할을 한다. Cutcell 격자방법을 이용하여 격자를 구현하였고 내부는 Structured mesh를 외부 곡면에는 Tetrahedral과 Pyramid mesh를 적용하였다. 해석의 정확도를 높

이기 위하여 캐니스터 외벽과 오버팩 측면벽 근처에 Layer를 추가하였다. 생성된 격자수는 총 2800만개였다.

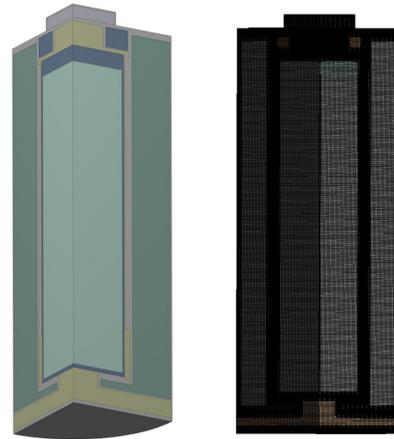


Fig.1. Geometry & mesh on concrete storage cask.

2.2 경계조건 및 물성치

Realizable k-ε의 난류모델과 벽면근처에서는 Standard Wall Function을 적용하였다. 입구와 출구는 Pressure inlet과 Pressure outlet이며 유속을 증가한 경우에는 Velocity Inlet으로 변경하여 1, 3, 5m/s의 값을 입력하였다. 캐니스터에서 발생하는 열량은 1785.5 W/m³이다. SIMPLE 모델을 사용하였고 Momentum과 Turbulence 항은 Second order를 사용하였다. Body Force Weighted와 PRESTO!를 사용하여 압력항을 계산하였다. 물성치는 문헌에서 제시한 값을 이용하였다⁽¹⁻⁴⁾.

3. 해석결과

Fig. 2는 공기입구의 속도에 대해 재질별 최대온도를 나타낸다. 최대온도는 유속이 3 m/s 까지 급격히 감소하다가 5 m/s 이상부터는 완만하게 감소하였다. 속도가 빨라지면 많은 유량이 공기유로로 들어가기 때문에 온도저감 효과가 컸다. Fig. 3은 환형관내 온도분포를 나타낸다. 속도가 0 m/s의 경우 온도분포는 좌우 비슷하였고 속도가 증가하면 한쪽으로 몰리는 경향이 나타났다. 이는 서로 다른

벽면에서 발생하는 유동간 교란이 일어났기 때문인 것으로 판단된다.

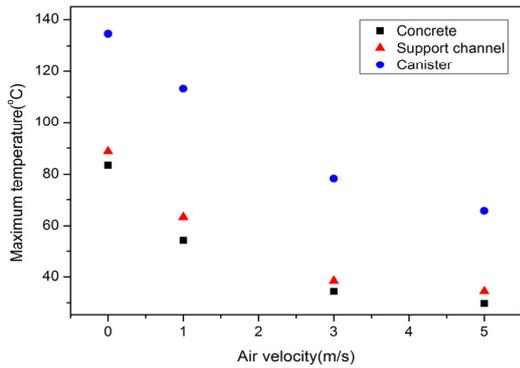


Fig. 2. Maximum temperature on components.

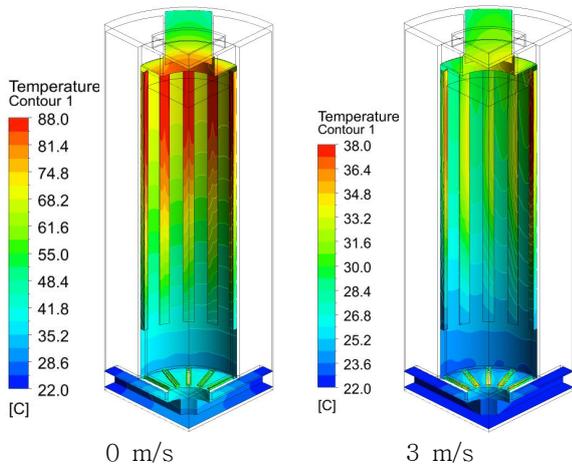


Fig. 3. Temperature distributions depending on velocity variation inside air path(Annulus).

Fig. 4의 (a)와 (b)는 출구에서 온도분포와 출구로 연결되는 오버팩내 상부 중앙통로에서의 속도분포이다. Fig. 4(a)에서 속도가 0m/s인 경우 바닥면에서 온도가 주변보다 낮게 측정되었고 역류현상이 나타났다. 그러나 속도가 있는 경우에는 역류는 발생하지 않았고 유동이 한쪽으로 치우치는 경향을 보였다. Fig. 4(b)에서는 속도유무에 상관없이 유동이 정체되는 현상이 관찰되었다. 이는 환형관 내벽을 따라 발달한 유동이 캐니스터 뚜껑의 중심부분까지 도달하지 못하고 통로측면을 따라 상승했기 때문인 것으로 판단된다. 이로 인해 통로 벽면에서의 온도는 높게 측정되었다. 캐니스터의 높이가 커질수록 측정된 국부 대류열전달계수는 커졌고 같은 높이에서 속도가 증가하면 낮아졌다. 그러나 속도가 더 증가하여 5m/s가 되면 관내 속도분포가 일정해지는 완전발달유동(Fully developed-flow) 형태가 나타났다.

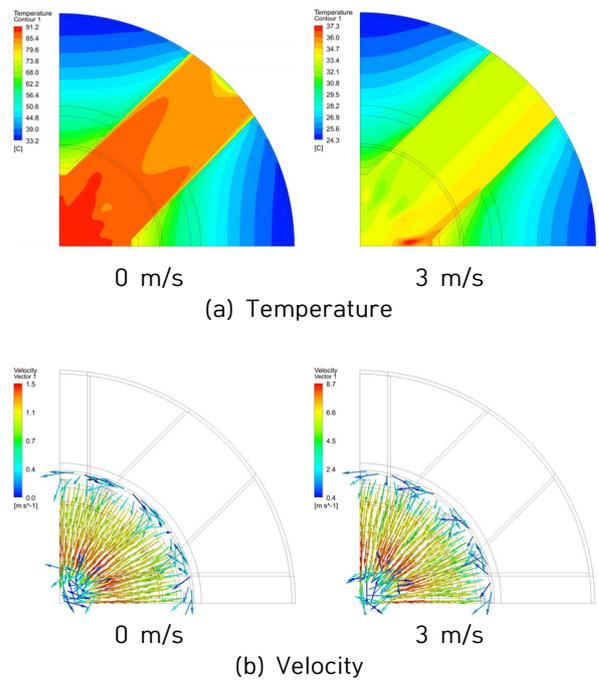


Fig. 4. Temperatures at air outlet and velocities in overpack top center.

4. 결론

콘크리트 저장용기의 공기입구로 들어오는 공기 속도에 따라 유로내 대류열전달 현상에 대해 수치 해석적 연구를 수행하였다. 유로내 속도가 빨라지면 재질별 최대온도는 감소하였고 열전달이 향상되었다. 이는 환형관내 혼합대류의 순부력 유동에 기인하였기 때문이다. 또한, 출구근처에서는 역류현상이 관찰되지 않았고 환형관 내부에서는 완전발달유동 현상이 나타났다. 향후계획으로 유로내 간격에 따른 대류열전달 연구를 수행할 계획이다.

5. 참고문헌

- [1] F.P. Incropera and D.P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th, John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [2] ASME BPVC Code, Section II, Part D-Properties, 2010.
- [3] M. Fintel, "Handbook of Concrete Engineering", 2nd, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985.
- [4] NRC Docket No. 72-1014, "Final Safety Analysis Report for the HI-STORM100 cask system", Rev. 9, Holtec International Inc., 2010.