

FLUENT를 활용한 콘크리트 건식 저장용기 공기유로 내부 유동장 해석

강 경 욱*, 김 형 진, 조 천 형
 한국원자력환경공단 기술연구소

ANALYSIS ON FLOW FIELDS IN AIRFLOW PATH OF CONCRETE DRY STORAGE CASK USING FLUENT CODE

G.U. Kang*, H.J. Kim and C.H. Cho

Research & Development Institute, Korea Radioactive Waste Agency

This study investigated natural convection flow behavior in airflow path designed in concrete dry storage cask to remove the decay heat from spent nuclear fuels. Using FLUENT 16.1 code, thermal analysis for natural convection was carried out for three dimensional, 1/4 symmetry model under the normal condition that inlet ducts are 100% open. The maximum temperatures on other components except the fuel regions were satisfied with allowable values suggested in nuclear regulation-1536. From velocity and temperature distributions along the flow direction, the flow behavior in horizontal duct of air inlet and outlet duct, annular flow-path and bent pipe was delineated in detail. These results will be used as the theoretical background for the composing of airflow path for the designing of passive heat removal system by understanding the flow phenomena in airflow path.

Key Words : 공기유로(Airflow Path), 콘크리트 저장용기(Concrete Storage Cask), 자연대류(Natural Convection), 피동열제거시스템(Passive Heat Removal System), 사용후핵연료(Spent Fuel)

1. 서 론

국내 원자력발전소의 습식저장 시설에서 임시보관 중인 가압경수로(Pressurized water Reactor)형 사용후핵연료(Spent fuel)의 포화가 예상됨에 따라 사용후핵연료 건식저장(Dry storage)에 대한 관심이 증가하고 있다. 건식저장 방법 중 하나인 콘크리트 저장용기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수직 원통형의 콘크리트 오버팩(Over pack)과 금속 캐니스터(Canister)로 구성되어 있고 사용후핵연료에서 발생한 붕괴열을 자연대류에 의해 외부 환경으로 효과적으로 제거할 수 있도록 피동열제거 시스템(Passive heat removal system)이 설계되어 있다.

사용후핵연료 콘크리트 저장용기는 안전성 확보를 위해 정상조건, 비정상 조건 및 사고조건에 대하여 열적 건전성을 입증하도록 법적요건으로 규제된다[1,2]. 이러한 규제요건에 따

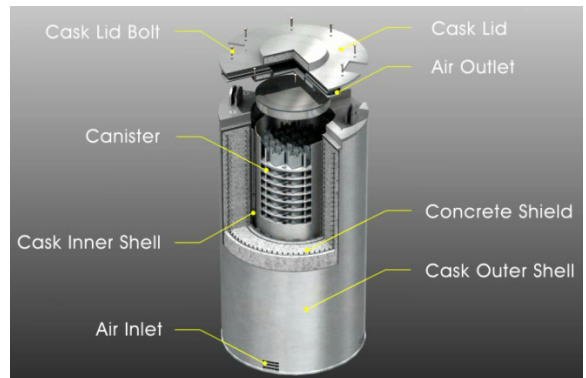


Fig. 1 Concrete storage cask

라 각 조건별로 저장용기 구성품 및 사용후핵연료 피복관에 대한 온도는 설계 허용값 이내로 유지되어야 한다. 미국 원자력규제위원회의 표준심사지침인 NUREG-1536에 따르면 정상 조건은 공기입구가 100% 열린 경우를 말하며 외기온도는 지역별 연평균 일일 최대온도를 적용한다. 비정상 조건은 공기입구가 부분적으로 막힌 조건과 사고조건인 경우에는 공기입

Received: April 4, 2016, Revised: May 31, 2016,
 Accepted: May 31, 2016.

* Corresponding author, E-mail: kku@korad.or.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2016.21.2.047>

© KSCFE 2016

구가 100% 완전 막힘 조건을 해석 시 설계요건으로 제시한다 [2]. 이렇듯 콘크리트 저장용기의 열적 건전성을 확보하기 위해서는 피동열제거시스템이 매우 중요하다.

피동열제거시스템은 크게 오버팩 상·하부에 4개의 공기 입·출구 수평덕트와 오버팩의 하부 및 측면면과 일정한 간격으로 캐니스터가 안착되면서 생긴 수직의 환형유로(Annular flow-path)로 구성된다. 이때, 환형유로에서는 굴뚝효과가 발생한다. 굴뚝효과란 가열부에 의해 뜨거워진 유체가 굴뚝 내부에서 부력을 받아 위로 상승할수록 속도가 증가하여 질량유량률이 증가되는 현상이다[3,4]. 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동은 공기입구를 통해 외부공기가 유입되고 캐니스터와 오버팩 사이의 환형유로에서 굴뚝효과에 의해 상향 유동이 발달하며, 최종적으로는 공기출구를 통해 외부환경으로 빠져나간다. 그러나 실제로 피동열제거시스템을 구성하는 공기유로는 단순한 수평덕트와 수직 환형유로가 아닌 유로 표면에 설치된 다양한 형상의 구조물들로 인해 구조가 다소 복잡하고 이로 인해 다양한 자연대류 유동이 발생한다.

Herranz et al.[5]은 콘크리트 저장용기 HI-STORM 100S에 대해 정상조건인 경우 열해석을 수행하였다. 피복관의 최대온도는 약 350℃로 허용온도인 400℃ 보다 약 50℃정도 낮은 결과를 보였고 열적 건전성이 확보됨을 보였다. In et al.[6]은 사용후핵연료 피복관의 온도분포를 예측하기 위해 CFD 해석을 수행하였다. 저장용기 내부에서 계산한 헬륨 유동과 온도는 실험한 결과와 일치함을 보였고, 피복관의 최대온도는 330℃로 평가되었다.

지금까지 콘크리트 저장용기의 안전성 평가는 설계기준에서 요구하는 조건에 따라 해석이 수행되어 왔기 때문에 피동열제거시스템을 구성하는 공기유로에서의 유동 현상에 대해서는 상대적으로 적은 관심을 받아왔다. 본 연구에서는 상용 전산유체역학코드인 FLUENT를 활용하여 정상조건인 경우 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동장을 상세히 분석하였다.

2. 콘크리트 저장용기 및 공기유로 형상

Fig. 1은 콘크리트 저장용기 형상을 나타낸다. 철근 콘크리트 구조물인 원통형의 콘크리트 오버팩은 높이가 5,780 mm, 직경이 3,266 mm이며, 내부와 외부벽면에 탄소강 재질의 라이너판(Linar plate)이 설치된다. 오버팩의 하부와 상부에는 384 mm × 250 mm의 공기입구 덕트와 640 mm × 150 mm의 공기출구 덕트가 각각 4개씩 설치되어있다. 내부 구조를 명확히 살펴보기 위하여 ANSYS DesignModeler를 활용하여 3차원, 1/4 축대칭 모델을 생성하여 Fig. 2에 나타내었다. 콘크리트 저장용기의 전체적인 형상과 연료영역, 캐니스터 및 콘크리트 를 제외한 오버팩의 구조이다. Fig. 3(a)-(c)는 공기유로의 형

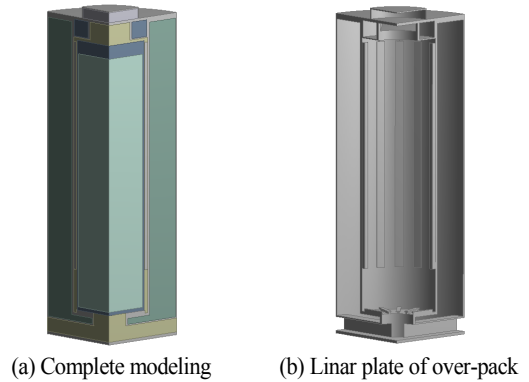


Fig. 2 Model of concrete storage cask

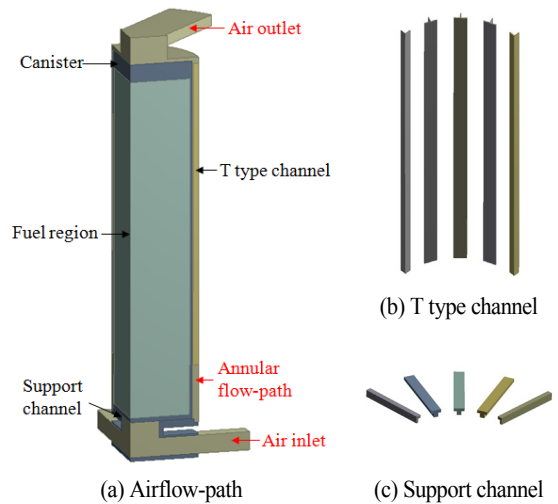


Fig. 3 Airflow-path region

상과 T형 채널 및 방사형 채널을 각각 나타낸다. 오버팩의 하부에는 입구를 통해 들어온 외부 공기가 수직 환형유로로 적절히 분배될 수 있도록 16개의 방사형 구조물이 22.5° 간격으로 부착되어 있는데 이 위에 캐니스터가 안착된다. 캐니스터는 직경 1,686 mm, 높이 4,880 mm의 원통형의 형태이며, 실제 캐니스터 내부의 연료영역은 핵연료 집합체와 바스켓, 바스켓을 지지하는 디스크와 지지봉으로 구성되고 금속 구조물을 제외한 자유체적에 불활성 기체인 헬륨이 채워진다. 바스켓 하부의 측면과 디스크 가장자리에는 구멍이 뚫려 있는데 이곳을 통해 유동이 순환한다. 또한, 오버팩의 측면벽에는 방사형 구조물 바닥면으로부터 781 mm 떨어진 높이에서부터 16개의 T형 채널이 수직방향으로 길게 뻗어 있고 22.5° 간격으로 방사형 구조물과 동일 선상에 부착되어 있다.

캐니스터는 오버팩의 측면벽과 일정한 간격을 유지한채 방

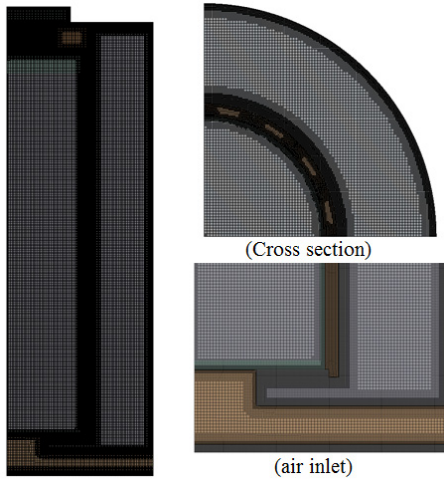


Fig. 4 Constructed mesh for thermal analysis under normal condition

사형 구조물 위에 놓이고 T형 채널의 평면벽과 닿지 않는다. 이때, 캐니스터 외벽과 오버팩 내벽 사이의 거리는 70 mm로 수직의 환형유로, 즉 굴뚝을 형성한다. 입구 덕트에서 들어온 외부 공기가 환형유로를 따라 상승하여 출구 덕트로 원활하게 흐를 수 있도록 오버팩 하부 및 상부 중앙에 직경이 각각 800 mm, 1,000 mm의 원형유로가 설계되어 있다. 즉, 공기유로는 공기 입·출구의 수평덕트, 수직 환형유로 및 각관 등의 기하구조로 구성되고 내부 표면에는 방사형 구조물과 T형 채널이 설치되어 있어 다소 복잡한 구조의 피동열체거시스템 형상을 취한다.

3. 해석방법

공기입구가 100% 열린 정상조건에 대한 콘크리트 저장용기 열해석을 위해 ANSYS DesignModeler와 Meshing 프로그램을 이용하여 3차원, 1/4 축대칭 모델과 격자를 구성하여 Fig. 2와 4에 각각 나타내었다. Cutcell 격자 기법을 이용하였다. Cutcell 기법은 전체 모델에 대해 격자를 생성하며 Cartesian 기법으로 내부를 정렬 격자로 만들기 위한 방법으로 형상 표면을 제외한 부분은 Sweep 격자가 생성되고 형상표면은 Tetra와 Pyramid 격자를 활용하는 방법이다.

공기유로 내부의 유동장 해석이 본 연구의 목적이므로 캐니스터 내부의 연료영역은 원통형 실린더로 단순화 시켰고 저장용기의 뚜껑 볼트는 모델링 대상에서 제외시켰다. 가열벽면에서 발달하는 자연대류 경계층은 매우 얇기 때문에 정확도 향상을 위해 유동과 접하는 공기유로의 모든 벽면근처에 Boundary layer를 넣어 조밀한 격자를 생성하였다. 생성된 총 격자수는 약 2,800만개였다. 상용 전산유체역학코드인

FLUENT 16.1을 사용하여 자연대류 해석을 수행하였다[7]. Table 1-4는 해석에 사용된 열물성치 값을 나타낸다. 탄소강과 스테인리스강의 표면방사율은 0.44와 0.36을 적용하였다[8]. 난류모델은 재순환 영역, 박리, 압력 변형이 큰 유동 예측에 유리한 k-ε 계열인 Realizable k-ε 모델을 사용하였고, Near-Wall Treatment는 복잡한 유동 예측이 가능한 Standard wall function을 채택하였다. 복사 열전달 모델은 DO(Discrete Ordinates)모델을 이용하였고 태양열에 의한 복사량은 고려하지 않았다. 압력은 대기압으로 공기입구와 출구 덕트에 Pressure inlet과 Pressure outlet으로 설정하였다. Incompressible ideal gas를 사용하였다. 외기 온도는 22℃로 설정하였고 콘크리트 저장용기의 바닥면은 단열조건으로 하였다. 저장용기 표면과 외부 환경과의 대류열전달을 모사하기 위하여 임의의 대류열전달계수(h) 5 W/m²K를 입력하였다. 실린더 형태의 연료영역에서 발생하는 열량은 1,758.5 W/m³이다. 이 값은 해석 모델이 원형모델의 1/4이므로 원형모델의 총 열량인 16.72 kW에 1/4로 나누고 연료집합체의 부피로 나누어 산출하였다. Pressure-velocity coupling은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. Momentum, Energy 및 Turbulence 항은 Second order upwind를 사용하였고 Pressure 항은 고부력 유동에 적합한 Body force weighted를 적용하였다.

Table 1 Thermal property for air[10]

Temp.	27	127	227	327	527
ρ(kg/m ³)	1.1614	0.8711	0.6964	0.5804	0.4354
Cp(J/kgK)	1007	1014	1030	1051	1099
k(W/mK)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0573

Table 2 Thermal property for stainless steel SA240 Type 316 L[11]

Temp.	20	100	300	500	700
ρ(kg/m ³)	8030				
Cp(J/kgK)	491.8	511.4	540.0	566.5	581.3
k(W/mK)	14.1	15.4	18.4	21.2	23.9

Table 3 Thermal property for concrete[12]

Temp.	37.8	93.4	260.1	537.8
ρ(kg/m ³)	2307			
Cp(J/kgK)	1046.7			
k(W/mK)	2.07	1.90	1.73	1.38

Table 4 Thermal property for carbon steel[11]

Temp.	20	100	300	500	700
ρ(kg/m ³)	7750				
Cp(J/kgK)	415.6	463.0	533.7	636.8	846.5
k(W/mK)	60.4	58.0	49.2	40.5	31.1

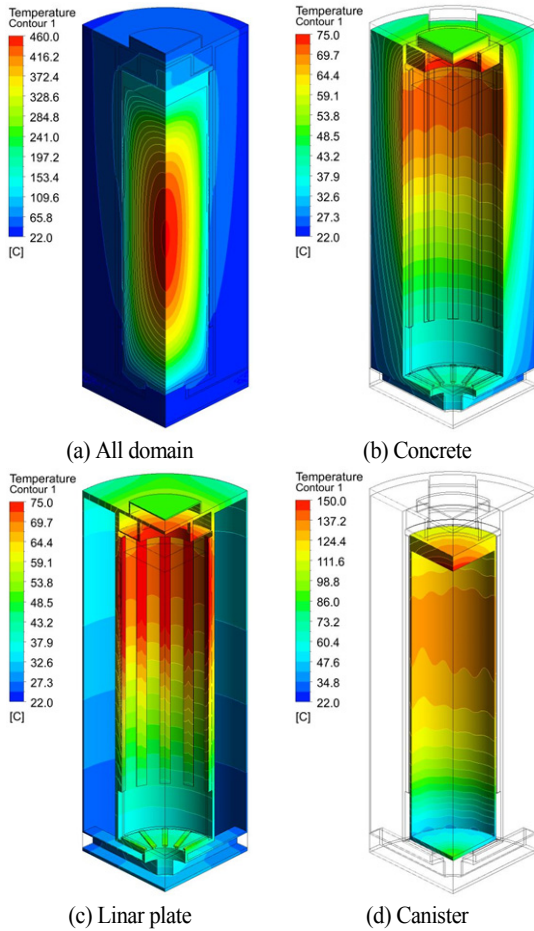


Fig. 5 Temperature distributions for each component of concrete storage cask under normal condition

4. 결 과

4.1 구성품별 온도분포

Fig. 5는 콘크리트 저장용기 정상조건에 대한 열해석 결과이다. 각 구성품별 측정된 최대온도를 설계기준에서 요구하는 허용온도와 함께 Table 5에 나타내었다. Fig. 5(a)의 경우 연료 영역에서의 최대온도는 허용온도인 400°C보다 높게 나타났고

Table 5 Maximum temperature on each component

Components	Max. temp.(°C)	Allowable temp.(°C)
Fuel region	461	400[2]
Concrete	74.8	93(Local)[13]
Canister	149.9	427[14]
T Type channel	80.3	371[14]
Linar plate	87.8	371[14]

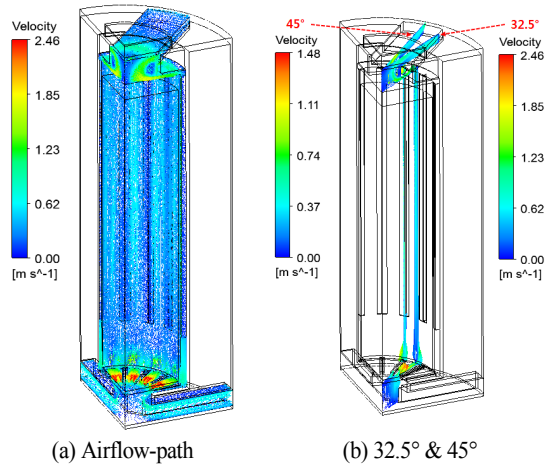


Fig. 6 Velocity distribution in airflow-path of concrete storage cask

나머지 구성품의 경우에는 허용온도 이내로 유지되었다. 실제, 캐니스터 내부의 연료영역은 핵연료집합체, 바스켓, 디스크 및 지지봉 등이 구조물로 구성되어 전도 열전달과 헬륨이 채워져 있어 자연대류 열전달이 발생한다. 즉, 자연대류와 전도에 의해 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열이 캐니스터 외벽으로 전달된다. 그러나 연료영역을 실린더로 취급한 해석모델에서는 전도에 의해서만 열을 전달하기 때문에 온도가 높다. Fig 5(b)-(d)의 경우 굴뚝효과가 발생하는 환형유로를 따라서 구성품별 표면의 온도는 가열부 하단에서 상단으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 부력이 낮은 가열부 하단에서 발생한 플룸(Plume)이 상승할수록 캐니스터의 벽면으로부터 열을 계속 전달 받고 플룸의 온도가 점점 높아졌기 때문이다. 특히, 캐니스터의 경우에는 상부로 올라갈수록 표면온도는 높아지다가 다시 낮아졌는데 이는 실린더 중심부에서 온도가 높고 위아래 영역으로 갈수록 온도가 낮기 때문이다. 캐니스터를 받치는 방사형 구조물 근처에서의 콘크리트와 라이너 판의 표면온도는 가열부에서 발생하는 열로 인하여 주변 온도보다 약간 높았다.

4.2 공기유로 내부의 속도장

Fig. 6는 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동분포를 나타낸다. 공기입구를 통해 들어온 유동은 환형관 유로를 따라 상승하면서 출구로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다.

공기 입구근처의 유체는 온도가 낮아 부력이 충분하지 않지만 캐니스터 즉, 가열부 근처의 유체가 부력을 지속적으로 받아 상승하기 때문에 빨리 들어오는 형태가 된다. 그리고 이 유동은 캐니스터 바닥과 맞닿는 방사형 구조물 사이를 균일하게 통과하고 이 영역에서 최대속도를 갖는다. 이러한 이유

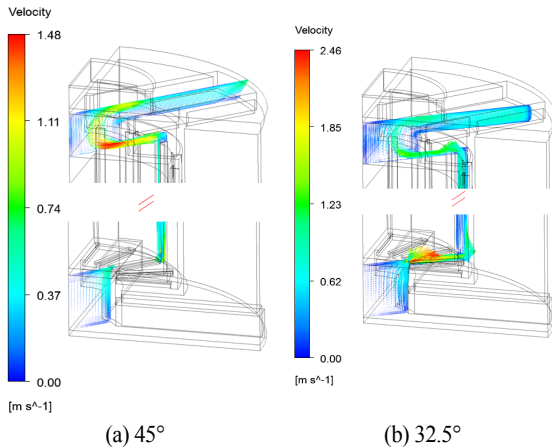


Fig. 7 Comparison of velocity distribution on angles in airflow-path

는 하부의 충분한 공간에 있던 유동이 면적이 좁은 구조물 사이를 통과해야 하는데 이때, 질량유량률은 어느 위치에서나 같아야 한다. 따라서 이 영역에서는 속도가 상대적으로 빨라지게 된다. 또한, 가열부의 아랫면에서는 하향 수평원판 자연대류 유동이 발생하여 속도를 증가시키는 효과도 발생한다. 환형유로의 하단으로 들어온 유체는 굴뚝효과에 의해 상단으로 올라갈수록 가속된다. 이 유동은 상단의 벽에 가로 막히게 되고 좁은 통로를 통과 하면서 속도가 빨라지다가 상부의 원형유로에 접어들면서 속도가 감소한다. Fig. 7(a)와 (b)는 방사형 구조물 사이의 영역과 구조물 영역에서 수직단면에 대한 상부와 하부의 유동분포를 비교한 것이다. 구조물 사이에서는 유동이 균일하게 분배되므로 임의로 32.5°의 각도를 선택하였고 구조물이 설치된 각도는 45°이다. 최대속도는 32.5°의 경우 2.46 m/s였고 45°의 경우에는 1.48 m/s로 큰 차이가 났고 발생한 위치도 달랐다. 45°의 경우, 하부의 공기유로에서 들어온 유동은 방사형 구조물에 의해 막히게 되고 가열부 측면의 하단에서부터 유동이 다시 발생한다. 이 유동은 상승하면서 또 다시 T형 채널에 막히게 되고 채널의 수평면과 캐니스터 외벽 사이의 좁은 유로를 통해서만 캐니스터 윗면과 직경이 1,000 mm인 원형유로에 도달한다. 캐니스터의 윗면 근처에서 최대속도가 나타났다. 이는 캐니스터 윗면의 가열부에서 발생한 수평원판에 대한 자연대류 유동이 속도증가에 기인했기 때문이며 플룸은 상승하면서 출구 쪽으로 휘어져 빠져나가는 유동패턴을 관찰할 수 있다. 한편, 상부 원형유로의 측면벽과 인접하는 곳에서 유동이 일부 정체되는 구간이 생겼는데, 이는 상부의 수평벽면과 캐니스터 윗면이 마주보는 길이가 길고 캐니스터 윗면에서 발생한 자연대류에 의해 주변에 있는 유동이 중심으로 이동하기 때문이다. 원형 유로의 직경을

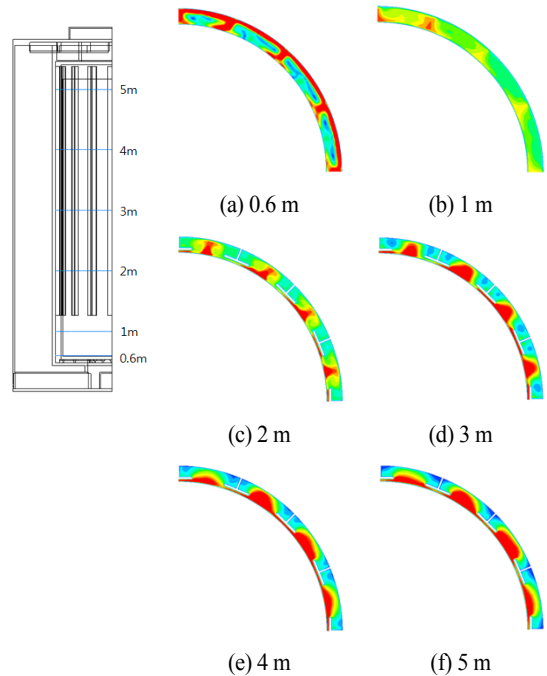


Fig. 8 Velocity contour on each height in annular flow-path

1,000 mm 보다 크게 설계하거나 사선 방향으로 유로를 설계한다면 유동이 정체되는 구간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 출구 덕트의 바닥면 근처에서 일부 역류하는 현상이 발생했다. 32.5°의 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 방사형 구조물 사이에서 최대속도가 나타났으며 유동의 진행을 가로막는 구조물이 없기 때문에 원활하게 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8(a)-(f)는 수직 환형유로인 굴뚝에서 발달하는 속도분포를 높이별로 나타내었다. 안쪽이 캐니스터 외벽 근처이고 바깥쪽이 오버팩 내벽 근처이다. 높이가 0.6 m의 경우, 속도가 빠른 유동이 오버팩의 근처에 밀집되어 있는 것을 볼 수 있다. 이 영역은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 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. 굴뚝은 플룸이 옆으로 확산되지 않고 위로 가속될수록 보호판 역할은 하는데 T형 채널이 역시 플룸의 모양을 유지시키는데 기여하였다.

Fig. 9은 공기유로 내부에서 높이별 최대속도를 나타낸 것으로 상부와 하부영역을 각각 6개씩 총 12개의 구간으로 나누었다. 공기입구, 하부의 원형유로, 방사형 구조물과 T형 채

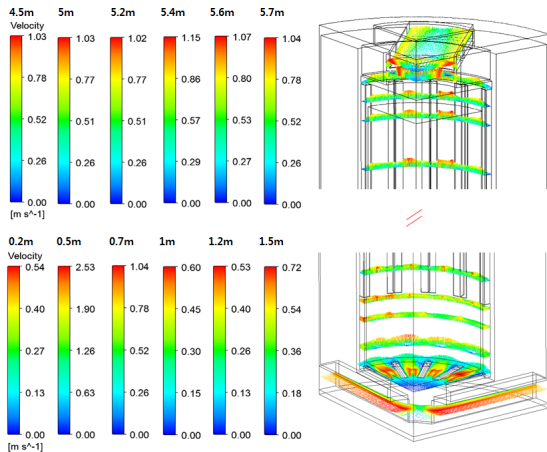


Fig. 9 Maximum velocity on each height in airflow-path

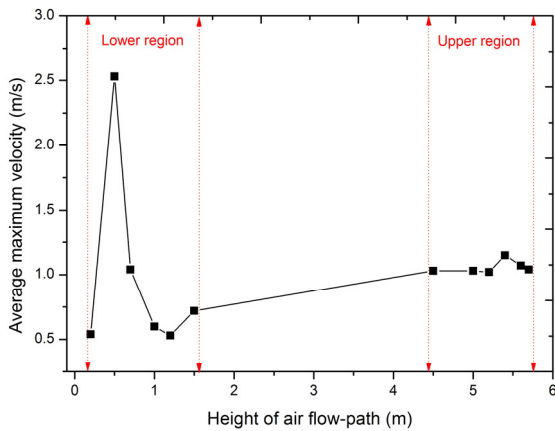
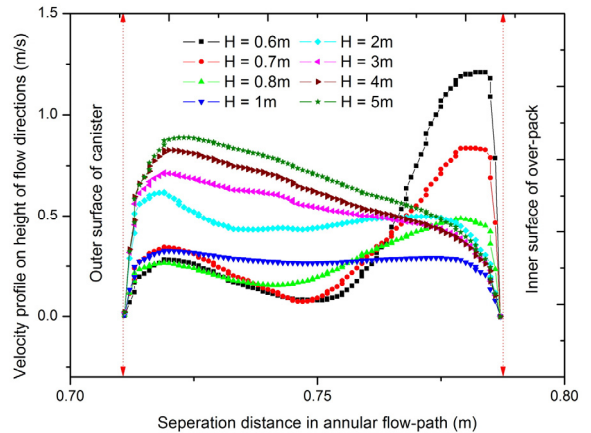


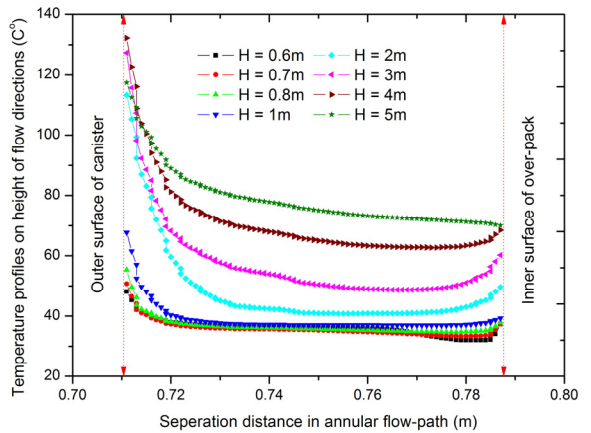
Fig. 10 Average maximum velocity on each height in airflow-path

널, 상부의 원형유로 및 출구를 통과하면서 최대속도가 발생하는 지점을 보여준다. 하부에서는 최대속도가 발생하는 지점이 골고루 분포되어 있지만 상부로 갈수록 출구와 보다 가까운 T형 채널 사이에서 속도가 약간 빨랐다. 보다 확연한 차이를 알아보기 위하여 각각의 구간에 대한 최대속도를 Fig. 10에 그래프로 나타내었다. 공기유로 하부의 경우, 입구를 통해 들어온 유동은 방사형 구조물 사이에서 최대속도를 보이고 환형유로를 따라 상승하면서 T형 채널 전까지 속도가 감소한다. 그러나 이 유동은 T형 채널을 통과하면서 속도가 다시 증가하기 시작하였고 환형유로의 가장 높은 위치에서 최대속도를 보이고 출구로 향하면서 속도가 점점 줄어들었다. 속도의 절대값은 하부의 방사형 구조물 사이의 영역을 제외하면 출구가 항상 높다.

Fig. 11(a)와 (b)는 환형유로에서 32.5°의 수직단면에 대한



(a) Velocity profile



(b) Temperature profile

Fig. 11 Maximum velocity on each height in airflow-path

속도와 온도분포를 대표적으로 나타낸 것이다. 속도분포의 경우 0.8 m의 높이까지 유체의 속도는 오버팩 근처에서가 빠르고 높이가 낮아질수록 속도는 증가했는데 이는 Fig. 8-10과 상응하는 결과이다. 1 m 높이에서 양쪽 벽면 근처에서의 속도는 거의 비슷했고 그 이상부터는 캐니스터 근처에서의 속도가 오버팩 근처의 속도를 앞질러 전형적인 자연대류 유동 패턴이 나타나는 것을 확인하였다.

온도분포의 경우, 캐니스터 근처의 온도는 특정구간까지는 상부로 갈수록 높다. 그러나 3 m와 4 m 높이에서의 온도가 5 m일 때 보다 높았고 3 m일 때보다 4 m 높이에서 온도가 높았다. 이러한 이유는 실린더의 중심부에서 발생하는 열전달의 영향을 받기 때문이다. 오버팩의 벽면 근처에서도 온도가 높았다. 이는 공기유로를 통해 대부분의 열이 자연대류에 의해 출구로 제거되지만 일부는 전도에 의해 콘크리트 외벽으로도 전달되기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 FLUENT를 활용하여 콘크리트 저장용기의 공기유로에서 발생하는 자연대류 유동현상을 다양한 측면에서 분석하였다. 캐니스터를 제외한 나머지 영역은 실제형상과 동일하며 공기입구가 100% 열린 정상조건에 대해 열유동 해석을 수행하였다. 구성품별 최대온도 및 표면온도를 산출하였고 설계기준 온도와 비교하였다. 내부 연료영역을 제외한 나머지 구성품의 최대온도는 허용온도 이내로 유지됨을 확인하였다. 굴뚝효과가 발생하는 환형유로에서 최대속도의 발생 위치는 방사형 구조물과 T형 채널, 그리고 유로면적에 따라 달라졌다. 공기입구를 통해 들어온 유동은 방사형 구조물 사이를 통과하면서 속도가 가장 빨랐다. 이는 하향 수평원판에서 발생하는 자연대류에 의한 영향과 유로면적이 좁았기 때문이다. 이 유동은 환형유로를 따라 상승하면서 속도가 점점 줄다가 T형 채널의 입구서부터 서서히 증가하기 시작했다. 상부로 발달할수록 가속을 받은 유동은 캐니스터의 윗면에 도달하여 상향 수평원판에서 발생한 자연대류와 유로면적에 의해 속도가 다시 빨라졌으며 출구로 빠져나가면서 서서히 감소하였다.

본 논문에서 기술한 현상은 그동안 상대적으로 관심이 적었던 콘크리트 저장용기의 피동열제거시스템에서 발생하는 유동패턴에 대해 이해하고 향후 보다 효율적인 피동열제거시스템을 설계하는데 있어서 공기유로를 구성하는 이론적 근거로 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.2014171020173A)

References

- [1] 2005, U.S Code of Federal Regulations, Licensing requirements for the independent storage of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste, Part 72, title 10.
- [2] 2010, U.S NRC, Standard review plan for spent fuel dry cask storage systems at a general license facility, Rev.1.
- [3] 1982, Haland, S.E. and Sparrow, E.M., "Solutions for the channel plume and the parallel-walled chimney," *Numerical Heat Transfer*, Vol.6, pp.155-172.
- [4] 2001, Auletta, A., Manca, O., Morrone, B. and Naso, V., "Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.44, pp.4345-4357.
- [5] 2015, Herranz, L.E., Penalva, J. and Feria, F., "CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage : Model fundamentals and sensitivity studies," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.76, pp.54-62.
- [6] 2014, In, W.K., Kwack, Y.K., Kook, D.H. and Koo, Y.H., "CFD simulation of heat and fluid flow for spent fuel in a dry storage," *Transactions of Korea Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 29-30.
- [7] 2015, *ANSYS FLUENT User's Guide*, release 16.1, ANSYS Inc.
- [8] 2010, Holman, J.P., *Heat Transfer*, 10th ed., McGraw-Hill.
- [9] 2010, U.S. NRC Docket No.72-1014, *Final safety analysis report for the HI-STORM100 cask system*, Rev.9, Holtec International Inc.
- [10] 1996, Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Willey & Sons Inc.
- [11] 2010, American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section II, Part D-Properties.
- [12] 1985, Mark, F., *Handbook of Concrete Engineering*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- [13] 2001, ACI-349R-01, *Code requirement for nuclear safety related concrete structure and commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [14] 2010, American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section III, Division 1-Subsections NB and NG.