

Porous Media Modelling and Verification of Thermal Analysis for Inlet and Outlet Ducts of Spent Fuel Storage Cask

사용후핵연료 저장용기 유로입출구의 다공성매질 모델링 및 열해석 검증평가

Ju-Chan Lee^{1*}, Kyung-Sik Bang¹, Woo-Seok Choi¹, Ki-Seog Seo¹, and Sungho Ko²

¹Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이주찬^{1*}, 방경식¹, 최우석¹, 서기석¹, 고성호²

¹한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

²충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

(Received November 13, 2017 / Revised December 15, 2017 / Approved January 25, 2018)

Bird screen meshes are installed at the air inlet and outlet ducts of spent fuel storage casks to inhibit the intrusion of debris from the external environment. The presence of these screens introduces an additional resistance to air flow through the ducts. In this study, a porous media model was developed to simplify the bird screen meshes. CFD analyses were used to derive and verify the flow resistance factors for the porous media model. Thermal analyses were carried out for concrete storage cask using the porous media model. Thermal tests were performed for concrete casks with bird screen meshes. The measured temperatures were compared with the analysis results for the porous model. The analysis results agreed well with the test results. The analysis temperatures were slightly higher than the test temperatures. Therefore, the reliability and conservatism of the analysis results for the porous model have been verified.

Keywords: Spent fuel, Concrete storage cask, Thermal analysis, Thermal test, Bird screen, Natural convection, Heat removal, Porous media

*Corresponding Author.

Ju-Chan Lee, Korea Atomic Energy Research Institute, E-mail: sjcleee@kaeri.re.kr, Tel: +82-42-868-2508

ORCID

Ju-Chan Lee <http://orcid.org/0000-0001-7682-8101>
Woo-Seok Choi <http://orcid.org/0000-0002-0100-9301>
Sungho Ko <http://orcid.org/0000-0002-6553-4682>

Kyung-Sik Bang <http://orcid.org/0000-0002-0528-0756>
Ki-Seog Seo <http://orcid.org/0000-0001-9085-9924>

사용후핵연료 저장용기의 공기 흡입구 및 배기구에는 외부환경으로부터 이물질의 유입을 방지하기 위하여 bird screen이 설치되며, bird screen에서는 공기의 유동 저항이 발생하게 된다. 본 연구에서는 Bird screen mesh의 단순화 모델을 이용한 열해석을 수행하기 위하여 다공성매질 해석모델을 개발하였다. CFD 해석을 이용하여 다공성매질에 대한 유동저항계수를 산출하고 이에 대한 신뢰성을 입증하였다. 다공성매질 해석모델을 이용하여 콘크리트 저장용기의 열해석을 수행하고 bird screen을 갖는 콘크리트 저장용기의 열시험을 수행하였다. Bird screen mesh를 고려한 열시험 결과와 다공성매질을 고려한 열해석 결과를 비교하였으며, 해석 및 시험결과가 서로 잘 일치하였다. 해석결과는 시험결과에 비하여 다소 높은 온도분포를 보여 다공성매질을 사용한 콘크리트 저장용기의 열해석 결과에 대한 신뢰성 및 보수성이 입증되었다.

중심단어: 사용후핵연료, 콘크리트 저장용기, 열해석, 열시험, 버드스크린, 자연대류, 열제거, 다공성매질

1. 서론

사용후핵연료에서는 장기간 강한 방사선과 붕괴열이 방출된다. 따라서 사용후핵연료 저장시설은 예상 수명기간 동안 핵연료의 미임계 유지, 잔열 제거, 방사선방어, 격납 건전성이 유지되어야 한다. 사용후핵연료 저장시설은 강제냉각 방식이 아닌 적절한 자연냉각 방식을 고려하여 저장시스템 내부의 온도를 가능한 낮게 함으로써 장기간 저장 시 내부의 사용후핵연료, 콘크리트, 기타 차폐재 및 밀봉재 등에 대한 열적 건전성이 유지되어야 한다.

콘크리트 저장용기는 피동냉각방식이 적용되며, 콘크리트 overpack 하부와 상부에 각각 공기 흡입구와 배기구를 설치하여 공기 순환방식의 자연대류를 이용하여 냉각하는 방식이다. 공기 흡입구 및 배기구에는 저장용기 주변으로부터 이물질의 유입을 방지하기 위하여 bird screen이 설치된다. Bird screen mesh의 박막에서는 유동면적 감소에 따른 압력강하가 발생하며, bird screen의 mesh 전체를 모델링

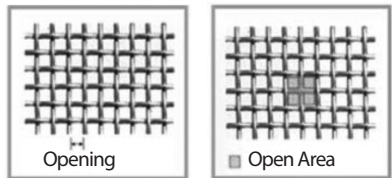
하여 열유동해석을 수행하기 위해서는 많은 전산용량과 계산시간이 요구된다. 따라서 일반적으로 mesh를 다공성매질로 모델링하거나 porous jump 경계조건을 적용하여 효율적인 해석을 수행한다.

본 연구의 목적은 21다발의 PWR 사용후핵연료를 저장할 수 있는 콘크리트 저장용기의 열해석을 효율적으로 수행하기 위하여 다공성매질 해석모델을 개발하고 bird screen이 설치된 실제 저장용기의 열시험 결과와 bird screen을 다공성매질로 단순화한 모델의 열해석 결과를 비교하여 해석결과에 대한 신뢰성을 평가하는데 있다.

2. 다공성매질 입력자료 산출

Table 1은 Bird screen의 일종인 wire mesh의 규격 및 형상을 나타낸다. Wire mesh의 #4는 25.4 × 25.4 mm의 면적을 4 × 4개의 목(目)으로 분할함을 의미하며, mesh 수가 증가

Table 1. Specification and shape for wire mesh

Mesh No.	Wire dia. (mm)	Opening (mm)	Opening area (%)	Shape
#4	0.71	5.64	78.9	
#6	0.71	3.53	69.6	
#8	0.71	2.46	60.2	
#10	0.71	1.83	51.8	
#12	0.71	1.40	43.6	

할수록 조밀한 mesh를 의미한다.

Wire mesh에서는 wire 사이의 작은 틈을 통하여 일정한 공기가 유입되는데 이는 균일한 형태의 다공성매질을 통하여 공기가 유입되는 현상과 유사하다. 따라서 bird screen mesh를 다공성매질로 단순화하여 유동해석을 수행할 수 있다. Bird screen의 mesh를 통과하면서 유동저항에 의한 압력강하가 발생하며, 다공성매질의 유동해석을 위한 입력자료로 유동저항계수 즉, 점성저항계수와 관성저항계수가 필요하다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 bird screen에서 유속에 따른 압력강하를 계산하고 유속과 압력강하 관계식으로부터 점성저항계수와 관성저항계수를 산출하였다. 다공성매질에서의 압력강하는 다음 식으로 표현된다[1].

$$\frac{\Delta P}{\Delta m} = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v + K\frac{1}{2}\rho v^2\right) \quad (1)$$

여기에서,

ΔP : pressure drop [Pa]

Δm : mesh thickness [m]

μ : fluid viscosity [kg·m⁻¹·s⁻¹]

α : permeability [m²]

ρ : fluid density [kg·m⁻³]

v : superficial velocity [m·s⁻¹]

K : inertial resistance factor [m⁻¹]

위 식에서 α 와 K 는 각각 다공성매질의 투과율(permeability)과 관성저항계수(inertial resistance factor)를 나타내며, α 의 역수(α^{-1})가 점성저항계수(viscous resistance coef-

ficient) 이다. 우변 첫째 항은 Darcy 법칙으로 점성에 의한 압력강하, 둘째 항은 Forchheimer 법칙으로 관성에 의한 압력강하를 나타낸다. Darcy 법칙은 유속이 매우 느린 유동에서 적용되며, 유속이 증가하면 관성효과가 증가되어 Forchheimer 법칙이 적용된다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 bird screen에서 유속에 따른 압력강하를 계산하고 유속과 압력강하 관계식을 이용하여 점성 및 관성저항계수를 계산하였다. 해석코드는 ANSYS FLUENT Ver.16.1[2]을 사용하였으며, Fig. 1은 bird screen의 유동해석 모델을 나타낸다. Bird screen의 전단에서는 velocity inlet 경계조건을 이용하여 실제 저장용기의 열유동해석 및 시험에서 얻은 0.4 ~ 0.8 m·s⁻¹의 유속을 고려하였으며, 후단에서는 pressure outlet 경계조건, 측면에서는 symmetry 경계조건을 고려하여 bird screen mesh를 통과하면서 발생하는 압력강하를 계산하였다.

Table 2는 Mesh #4 ~ Mesh #12에 대하여 유속에 따른 bird screen 전후단의 압력강하 계산 결과를 나타낸다. Bird screen 입구의 유속에 비례하여 압력강하가 증가하였다.

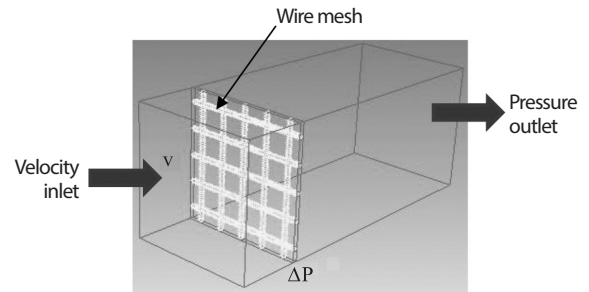


Fig. 1. Fluid flow analysis model.

Table 2. Pressure drop in the bird screen as variations of velocity and mesh size

Velocity [m·s ⁻¹]	Pressure drop [Pa]				
	Mesh #4	Mesh #6	Mesh #8	Mesh #10	Mesh #12
0.4	0.0509	0.0945	0.1543	0.259	0.3948
0.5	0.0730	0.1356	0.2213	0.3681	0.5700
0.6	0.0981	0.183	0.2991	0.4968	0.7761
0.7	0.1265	0.2368	0.3877	0.6423	1.0126
0.8	0.1581	0.2965	0.4871	0.806	1.2795

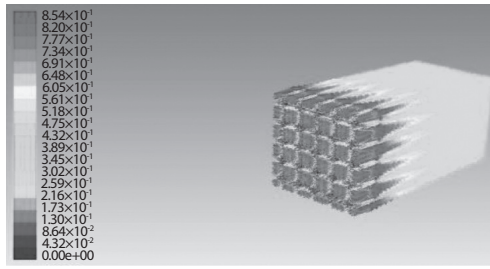


Fig. 2. Velocity vector (Mesh #8, $v = 0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

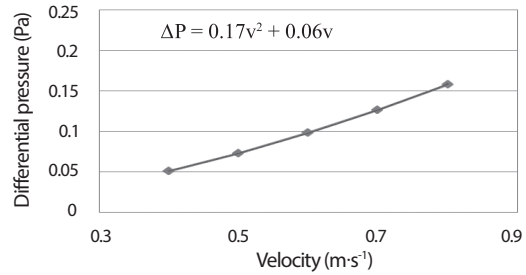
Fig. 2는 mesh #8, 유속 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건에서 bird screen에서의 속도벡터를 보여주고 있다. Table 2의 bird screen의 유속에 따른 압력강하 해석 결과를 이용하여 Fig. 3과 같이 근사식을 유도하였으며, 이 근사식과 식 (1)을 이용하여 다공성매질 모델에 대한 유동저항계수(점성저항계수, 관성저항계수)를 구할 수 있다[3].

Table 3은 bird screen mesh의 다공성매질 모델에 대한 유동저항계수 계산결과를 보여준다. 콘크리트 저장용기에서는 배기구의 온도가 흡입구의 온도보다 높고 유동저항계수에 영향을 미치는 공기의 특성(점성계수, 밀도)이 온도에 따라 변하므로, 입출구의 점성저항계수 및 관성저항계수 값이 다르게 계산되었다.

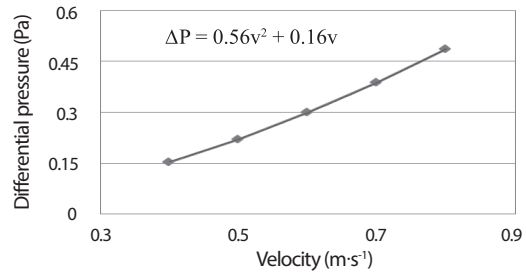
위에서 산출된 다공성매질 모델의 유동저항계수에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 실제 mesh 모델과 다공성매질 모델에 대한 해석을 수행하였으며, Table 4와 같이 2가지 모델에서 mesh 전후단의 압력강하 차이는 1 ~ 7% 이내로 잘 일치하였다. 따라서 다공성매질의 유동저항계수에 대한 신뢰성이 입증되었다.

3. 콘크리트 저장용기의 열해석

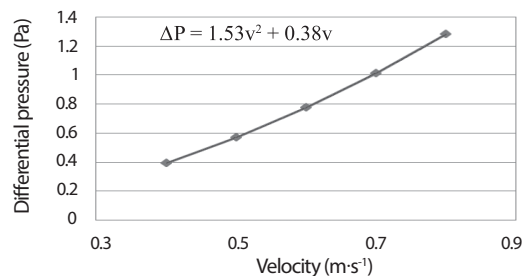
콘크리트 저장용기의 원형모델(Prototype)에 대하여 유로 입출구의 mesh 크기에 따른 열해석을 수행하였다. 콘크리트 저장용기는 Fig. 4와 같이 사용후핵연료를 장전하는 캐니스터와 방사선차폐 기능을 하는 콘크리트 overpack으로 구성된다. 캐니스터에는 21다발의 PWR 사용후핵연료를 장전하기 위한 정방향 셀(cell)을 갖는 바스켓(basket) 구조물이 설치되고, 내부에 헬륨을 충전하여 장기저장 시 사용후핵연료의 건전성이 유지되도록 한다. 콘크리트 및 사용후핵연료



(a) Mesh #4



(b) Mesh #8



(c) Mesh #12

Fig. 3. Results of pressure drop and approximation formula.

피복관의 온도를 허용치 이내로 유지하기 위하여 콘크리트 overpack의 하부 및 상부에는 각각 4개의 공기 흡입구와 배기구를 설치하여 공기 순환에 의한 자연대류를 통하여 핵연료로부터 발생하는 붕괴열을 적절히 제거할 수 있도록 하였다.

3.1 열해석 모델

콘크리트 저장용기의 열해석 모델은 시험모델과 동일한 모델을 사용하였다. 실제 저장용기의 캐니스터 내부에는 사용후핵연료를 적재하기 위한 basket이 설치되나, 열시험 모델에서는 캐니스터와 콘크리트 overpack은 실제 저장용기와 동일하며, 캐니스터 내부의 바스켓 구조물을 제외하고 캐니스터 내부의 붕괴열을 단일 전기히터로 모사하였다.

Table 3. Results of flow resistance coefficients for porous media model of bird screen meshes

Mesh size	Approximation formula	Permeability (α), [m ²]		Inertial res. factor (K), [m ⁻¹]	
		Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
#4	$P = 0.174v^2 + 0.059v$	2.20×10^{-7}	2.66×10^{-7}	406	468
#6	$P = 0.344v^2 + 0.104v$	1.25×10^{-7}	1.51×10^{-7}	803	925
#8	$P = 0.556v^2 + 0.164v$	7.90×10^{-8}	9.56×10^{-8}	1,299	1,494
#10	$P = 0.901v^2 + 0.287v$	4.51×10^{-8}	5.46×10^{-8}	2,105	2,422
#12	$P = 1.531v^2 + 0.375v$	3.46×10^{-8}	4.18×10^{-8}	3,576	4,115

Table 4. Comparison of pressure drop results between the real mesh and porous media model

	Pressure drop between the inside and outside of mesh [Pa]				
	Mesh #4	Mesh #6	Mesh #8	Mesh #10	Mesh #12
Real mesh	0.098	0.184	0.299	0.497	0.776
Porous model	0.105	0.194	0.307	0.504	0.784
Error (%)	7.1%	5.4%	2.7%	1.4%	1.0%

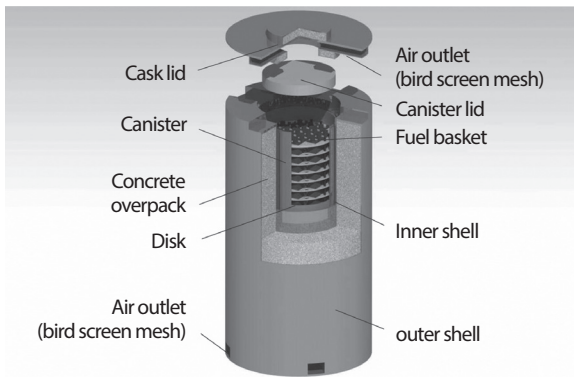


Fig. 4. Overview of concrete storage cask.

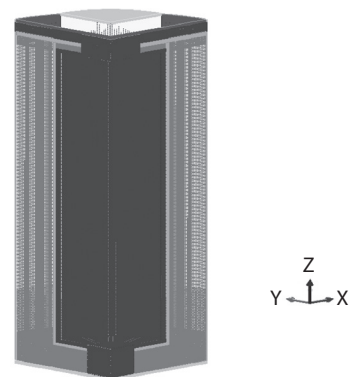


Fig. 5. Thermal analysis model of storage cask.

열해석에서는 캐니스터 내부를 제외하고 캐니스터 표면에서 열유속을 고려한 경우와 단일 히터를 고려한 경우에 유사한 온도분포를 얻을 수 있었다. 따라서 해석모델을 단순화함으로써 효율적인 해석을 위하여 캐니스터 내벽에서의 열유속(heat flux)을 고려하였다. 열해석 모델은 Fig. 5와 같이 3차원 1/4 단면모델을 사용하였다. 공기의 유속이 빠르고 급격한 온도변화가 예상되는 부위의 격자는 조밀하게 구성하였으며, 격자 민감도를 분석한 결과 약 300만개 이상에서는 온도 값의

차이가 없는 것으로 나타나 격자수는 300만개로 하였다.

해석조건은 정상조건을 적용하였으며, 저장용기 내부의 붕괴열은 16.8 kW, 대기온도는 20℃로 가정하여 정상상태에 대한 해석을 수행하였다. 캐니스터 내부에서 발생된 붕괴열은 캐니스터와 콘크리트 overpack 사이의 공기의 순환에 의한 자연대류와 콘크리트 overpack을 통한 열전도를 통하여 외부로 전달된다. 해석코드는 ANSYS FLUENT Ver.16.1을 사용하였다.

저장용기 내부의 유동은 난류유동으로 발전하며, 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였고 벽면근처의 처리는 standard wall function을 사용하였다. 복사열전달 방정식은 Discrete Ordinates 모델을 사용하였다. 공기 흡입구 및 배기구에 설치된 bird screen은 FLUENT에서 제공하는 다공성매질의 일종인 porous jump 경계조건을 이용하였다. Porous jump 경계조건에서는 유동저항계수(점성저항계수, 관성저항계수), 다공성 매질의 두께(0.71 mm)를 입력자료로 고려하였다. 다공성매질 해석모델에서는 Table 3의 mesh 크기에 따른 점성저항계수와 관성저항계수를 고려하였다. 공기 입출구의 경계조건은 pressure outlet 경계조건을 적용하였으며, 상온인 20 °C와 대기압을 고려하였다. 용기 표면에서는 대류 및 복사열전달이 일어나는 것으로 가정하였다. 저장용기는 수직원통 형상을 가지며, 용기 주변의 유동은 난류영역이므로 1기압 상온에서 대기에 의한 자연대류 열전달계수는 다음 식으로 정의된다[4].

$$\text{Vertical surface : } h_{nc} = 0.95(\Delta T)^{1/3} \quad (2)$$

$$\text{Horizontal plate : } h_{nc} = 1.40(\Delta T)^{1/3} \quad (3)$$

여기에서, h_{nc} : natural heat transfer coefficient ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
 ΔT : temperature difference between the cask surface and ambient (K)

위의 식을 이용하여 저장용기 측면의 대류열전달계수는 $1.95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 저장용기 상부 평면에서의 열전달계수는 $4.01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 로 계산되었다. 용기 표면에서의 복사열전달은 다음 식으로 정의된다.

$$q = A\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_a^4) \quad (4)$$

여기에서, A : heat transfer area (m^2)
 σ : Stefan-Boltzmann constant ($= 5.669 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
 ε : emissivity of surface material
 T_s : surface temperature (K)
 T_a : ambient temperature (K)

복사열전달은 주로 고온에서 일어나며, 같은 온도에서는 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. 용기 표면의

방사율은 0.9로 적용하였다.

해의 수렴성을 개선하고 발산 방지를 위하여 사용되는 완화계수(under-relaxation factor)는 FLUENT에서 설정된 기본값을 적용하였으며, 해석의 수렴 관정을 위한 허용 잔차(residual)는 연속방정식, 운동량, 난류운동에너지 및 소산률은 1.0×10^{-3} , 에너지방정식은 1.0×10^{-6} 값을 적용하여 수렴성을 평가하였다. Fig. 6은 iteration에 따른 잔차의 변화를 보여주며, 1350번 반복계산 이후 잔차가 수렴 관정기준 이하로 떨어졌다.

3.2 열해석 결과

Bird screen을 다공성매질로 모델링하여 mesh 크기에 따른 콘크리트 저장용기의 정상조건 열유동해석을 수행하였다. Fig. 7은 mesh #12 저장용기의 온도분포를 보여주고 있다. 캐니스터와 overpack 사이의 원활한 유동을 위하여 T형 채널(channel)을 설치하였다. 이들 채널은 공기 흡입구를 통해 캐니스터 하부에서 유입된 공기가 균일하게 분배되어 균일한 냉각이 되도록 하며, 이들 채널로 인하여 벽면의 온도가 여러 갈래로 보인다. 캐니스터 내벽에서는 열유속 경계조건을 고려하였으며, 캐니스터와 overpack 사이의 간극을 통한 외부공기의 순환으로 인하여 저장용기 상부의 온도가 높게 나타났다. Fig. 8은 mesh 크기에 따른 열해석 결과에서 캐니스터 표면, overpack의 내벽 및 외벽에서의 저장용기 높이에 따른 온도를 보여준다. Mesh가 증가할수록, 즉 조밀한 mesh의 경우에 유동저항이 커져서 온도가 미세하게 증가하는 것으로 나타났으며, 온도분포의 경향은 모두 동일하게 나타났다. Mesh #4와 mesh #8의 경우에 온도차는 평균 0.5°C, mesh #8과 mesh #12의 온도차는 1.1°C로서 mesh #8 이내에서는 유동저항 증가로 인한 온도상승이 미미한 것으로 분석되었다.

열해석에서 구한 배기구의 유속 및 온도 값을 이용하여 배기구를 통한 질량유동률(mass flow rate) 및 열전달률(heat transfer rate)을 아래의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho v A \quad (5)$$

$$q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{amb}) \quad (6)$$

여기에서,
 \dot{m} : mass flow rate ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

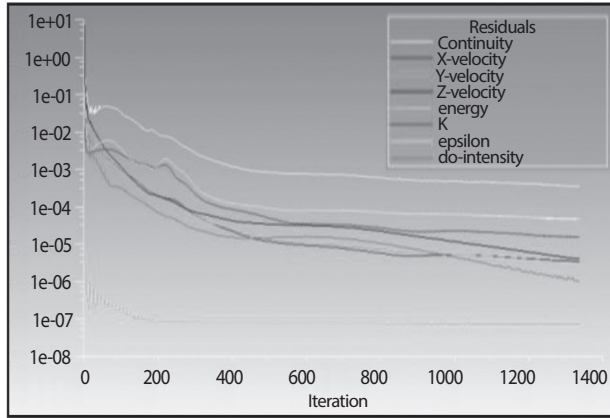


Fig. 6. Residual monitor for check of convergence.

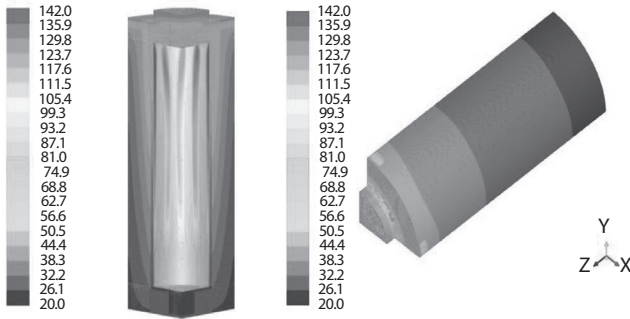
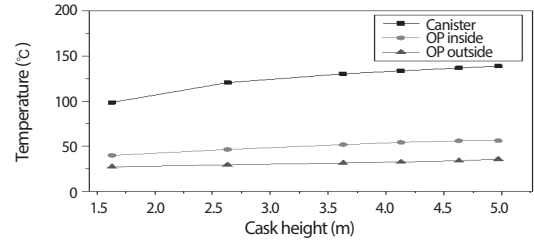
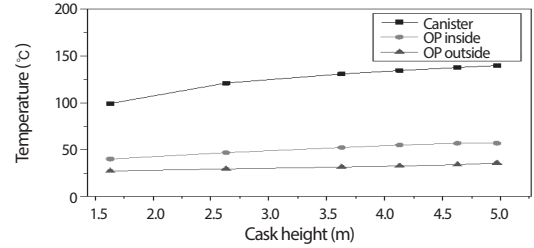


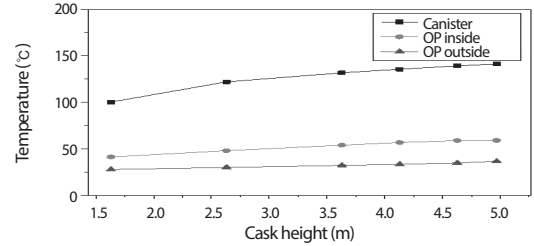
Fig. 7. Temperature contour of cask (Mesh #12).



(a) Mesh #4



(b) Mesh #8



(c) Mesh #12

Fig. 8. Temperature distribution of the cask as a variation of mesh sizes.

Table 5. Temperatures, velocities and heat transfer rates at the air inlet and outlet

	Air inlet		Air outlet		
	Temperature	Velocity	Temperature	Velocity	Heat transfer rate
Mesh #4	20.0°C	0.621 m·s ⁻¹	63.8°C	0.732 m·s ⁻¹	12.652 kW (75.3%)
Mesh #6	20.0°C	0.613 m·s ⁻¹	64.2°C	0.725 m·s ⁻¹	12.616 kW (75.1%)
Mesh #8	20.0°C	0.601 m·s ⁻¹	64.9°C	0.716 m·s ⁻¹	12.563 kW (74.8%)
Mesh #10	20.0°C	0.583 m·s ⁻¹	66.0°C	0.701 m·s ⁻¹	12.478 kW (74.3%)
Mesh #12	20.0°C	0.560 m·s ⁻¹	67.5°C	0.679 m·s ⁻¹	12.359 kW (73.6%)

ρ : density of air (kg·m⁻³)

v : velocity of air (m·s⁻¹)

A : cross section area of duct outlet (m²)

C_p : specific heat of air (J·kg⁻¹·°C⁻¹)

T_{out} : temperature of air at the duct outlet (°C)

T_{amb} : ambient temperature (°C)

Table 5는 공기 흡입구 및 배기구의 평균 온도 및 유속과 배기구를 통한 열전달률을 나타낸다. Mesh가 조밀해질수록 유동저항의 증가로 인하여 유속이 떨어지고 온도가

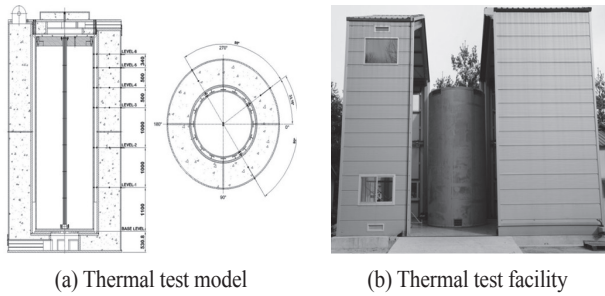


Fig. 9. Thermal test model and test facility.

상승하는 것으로 나타났다. 저장용기 내부에서 발생하는 총 열량(16.8 kW) 중에서 배기구를 통한 열전달률은 mesh #4의 경우 75.3%, mesh #12의 경우에는 73.6%로서 mesh가 조밀해질수록 저장용기의 열제거 효율이 감소하여 저장용기 내부 온도가 상승하는 것으로 나타났다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열의 약 75%는 배기구를 통하여 방출되고 나머지 25%는 콘크리트 벽면을 통하여 방출되는 것으로 분석되었다.

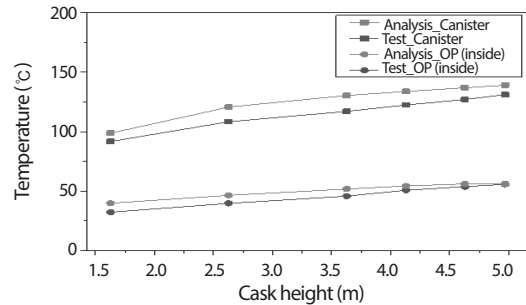
4. 저장용기의 열시험 및 해석결과 비교

콘크리트 저장용기의 공기 흡배기구에 설치되는 bird screen의 mesh 크기에 따른 정상조건에 대한 열시험 및 해석을 수행하고 시험 및 해석결과를 비교하였다.

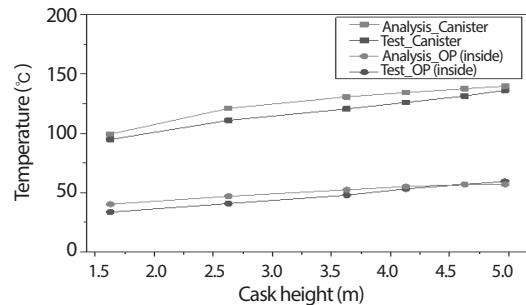
4.1 저장용기 열시험

열시험 모델은 직경이 3.31 m, 높이가 6.18 m로서 실제 저장용기와 동일한 크기(prototype)로 제작되었다. 콘크리트 저장용기의 캐니스터 내부에는 사용후핵연료를 적재하기 위해 basket이 설치되어 있으나, 시험모델에서는 basket을 제외하고 캐니스터 내부의 붕괴열을 단일 전기히터를 사용하여 모사하였다. 전기히터의 총 열유량은 16.8 kW이며, 히터는 단일 붕의 형태가 아니고 히터 봉당 16.6 Ω의 저항을 갖는 12개 히터가 병렬로 조립된 형태이다.

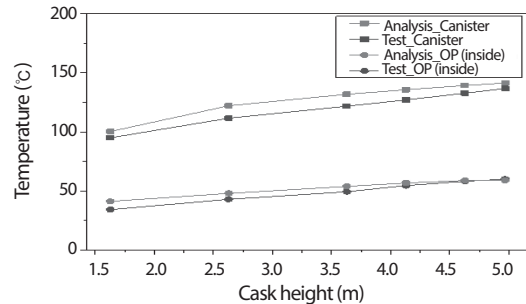
Fig. 9는 열시험 모델의 단면도와 시험설비를 보여준다. 저장용기의 온도 측정을 위하여 canister 표면, overpack 내벽, 콘크리트 중심부 및 overpack 외벽에 34°, 124° 및 214° 방향에 대하여 높이 방향으로 각 6개씩의 열전대를 부착



(a) Mesh #4



(b) Mesh #8



(c) Mesh #12

Fig. 10. Comparison of the thermal test and analysis results for various mesh sizes.

하였으며, 공기 입출구에 각 3개, 그리고 뚜껑 부위에 2개를 포함하여 총 80개의 열전대를 설치하였다. 열전대는 모두 K-type으로 스테인리스강으로 피복되어 있는 un-ground type을 사용하였다. 또한, 공기 흡배기구에서 유속을 측정하기 위하여 공기 흡입구는 낮은 온도영역에서 사용되는 hot wire type 유속계를, 공기 배기구에는 비교적 높은 온도에서 사용할 수 있는 vane type 유속계를 사용하였다. 저장용기의 공기 흡입구 및 배기구에 설치되는 bird-screen의 mesh 규격에 따른 열제거 능력을 평가하기 위하여 mesh 크기에 따른 열시험을 수행하였다[5].

Table 6. Comparison of heat transfer rates through the duct outlet between the thermal test and the analysis

	Mesh #4		Mesh #8		Mesh #12	
	Test	Analysis	Test	Analysis	Test	Analysis
Air temp.	60.7℃	63.8℃	66.8℃	64.9℃	68.0℃	67.5℃
Velocity	0.74 m·s ⁻¹	0.73 m·s ⁻¹	0.65 m·s ⁻¹	0.72 m·s ⁻¹	0.58 m·s ⁻¹	0.68 m·s ⁻¹
Mass flow rate	0.26 kg·s ⁻¹	0.29 kg·s ⁻¹	0.22 kg·s ⁻¹	0.28 kg·s ⁻¹	0.21 kg·s ⁻¹	0.28 kg·s ⁻¹
Heat transfer rate	14.2 kW	12.7 kW	12.6 kW	12.6 kW	11.6 kW	12.4 kW

4.2 열시험 및 해석결과 비교

Bird screen의 mesh 크기에 따른 콘크리트 저장용기의 열시험 및 열해석을 수행하고 시험 및 해석결과를 비교하였다. 시험모델에서는 bird screen mesh를 설치하였으며, 해석에서는 mesh를 다공성매질로 단순화시킨 해석모델을 사용하였다.

Mesh 크기에 따른 열시험에서는 주변온도가 20 ~ 27℃의 온도분포를 보였으며, mesh 크기에 따른 저장용기의 온도분포 경향을 분석하기 위하여 열해석에서는 주변온도를 20℃로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 열시험에서 측정된 주변온도 조건에 대한 해석을 별도로 수행하여 20℃의 주변온도 조건에 대한 해석결과와 비교함으로써 시험모델의 온도를 보정하고 20℃ 주변온도 조건에 대한 시험결과와 해석결과를 정량적으로 비교하였다.

열시험에서는 원주방향으로 3방향(34°, 124°, 214°)에 대한 온도가 측정되었고 각각의 방향에서 약간의 온도차를 보였으며, 열해석 결과에서는 저장용기가 원주방향으로 대칭 구조를 가지므로 원주방향으로 동일한 온도분포를 갖는다. 따라서 열시험 및 해석결과를 정량적으로 비교하기 위하여 시험에서 구한 원주방향(3방향) 온도의 평균값을 취하여 해석결과와 비교하였다.

Fig. 10에서는 주변온도 20℃의 정상조건에서 mesh #4, #8, #12의 경우에 대한 열시험 및 해석 결과를 비교하였다. 전체적으로 시험 및 해석결과에서 유사한 온도분포를 보였다. 해석결과가 시험결과에 비하여 캐니스터에서는 7 ~ 10℃, overpack 내벽에서는 3 ~ 5℃ 높게 나타났으며, 최대오차 16% 이내로 잘 일치하였다. Table 6은 공기 배기구에서의 온도,

유속 및 열전달률을 비교하여 나타내었다. 시험 및 해석결과에서 mesh가 조밀해질수록 열전달률이 떨어지는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 다공성매질을 이용한 열해석 결과에 대한 신뢰성과 보수성이 입증되었으며, 따라서 본 연구에서 제시된 다공성매질 해석모델은 저장용기의 열해석에 활용이 가능할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료 콘크리트 저장용기의 공기 흡배기구에 설치되는 bird screen을 다공성매질로 모델링하기 위한 입력자료를 산출하고 다공성매질 해석모델에 대한 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

Bird screen의 크기에 따른 CFD 해석을 수행하여 다공성매질에 대한 유동해석 입력자료를 산출하고 이에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 실제 mesh 모델과 다공성매질 모델에 대한 해석을 수행한 결과, mesh 전후단에서의 압력강하 차이가 1 ~ 7% 이내로 일치하여 다공성매질(유동저항계수)에 대한 신뢰성이 입증되었다.

다공성매질 입력자료를 이용하여 bird screen 크기에 따른 콘크리트 저장용기의 열유동해석을 수행하였다. Mesh가 조밀해질수록 유동저항이 증가하여 저장용기의 온도가 상승하고, 공기배기구를 통한 열전달률이 감소되었지만 그 차이는 크지 않았다.

Bird screen을 다공성매질로 단순화시킨 모델을 사용한 열해석 결과와 bird screen의 mesh를 설치하여 온도를 측정된

시험결과가 유사한 온도분포를 보여 해석결과에 대한 타당성이 입증되었다. 해석결과가 시험결과에 비하여 3 ~ 10℃ 정도 높은 온도를 보였지만 최대오차 16% 이내로 비교적으로 잘 일치하여 해석결과에 대한 신뢰성과 보수성이 입증되었다.

다공성매질 모델을 이용하여 bird screen을 갖는 콘크리트 저장용기의 효율적인 열해석이 가능하였으며, 본 연구결과는 건식저장용기의 설계 및 인허가 획득을 위한 기본 자료로 활용이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 지원에 의한 산업기술혁신사업(에너지기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다(No.20161720200930).

REFERENCES

- [1] P. Macini, E. Mesini, and R. Viola, "Laboratory Measurements of Non-Darcy Flow Coefficients in Natural and Artificial Unconsolidated Porous Media", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77(3-4), 365-374 (2011).
- [2] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT User's Guide, ANSYS Fluent, Ver.16.1 (2015).
- [3] J.W. Kang, J.A. Kim, E.Y. Kim, C.M. Jeong, H.D. Kim, and H.N. Chang, "CFD Analysis of Liquid Stream Going through the Wire-Screen Mesh", HEFAT2007, 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2-4, KAIST (2007).
- [4] J.P. Holman, *Heat Transfer*, International Student Edition 5th Ed., 310-311 (1985).
- [5] K.S. Bang, S.W. Yoo, J.C Lee, C.S. Seo, K.S. Seo, and W.S. Choi, Design Influence Assessment of Flow Passage Inlet and Outlet of Concrete Storage Cask, Korea Atomic Energy Research Institute Report, KAERI/TR-6036/2015 (2015).