

## Fluent 코드를 이용한 사용후핵연료 저장용기 열해석

### Thermal Analysis of Spent Fuel Storage Cask Using the Fluent Code

이주찬, 오승철, 구정희, 구대서, 신영준

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

본 연구에서는 범용 열유동해석 프로그램인 Fluent 코드를 이용하여 PWR 사용후핵연료 저장용기에 대한 열해석을 수행하였다. 열해석 방법 및 절차에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 기존의 24개 PWR 사용후핵연료집합체 저장용기에 대한 열해석을 수행하였으며, 또한, 이 용기에 96개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 24개의 금속저장체를 장전할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. PWR 핵연료를 금속전환할 경우 금속전환 과정에서 Sr과 Cs를 선택적으로 제거함으로써 냉각부하를 약 1/2로 줄일 수 있고 체적을 약 1/4로 줄일 수 있는 이점이 있다. 24개의 PWR 핵연료집합체에서의 붕괴열은 28 kW, 24개 금속저장체의 붕괴열은 54 kW로 고려하였다. 24개 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우 해석결과가 저장용기의 보고서에 제시된 온도와 비교적 잘 일치하였으며, 따라서 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다. 금속저장체를 고려할 경우 핵연료의 최고온도는 617 °C까지 상승하였다.

#### Abstract

Thermal analysis for spent fuel storage cask loaded with 24 spent PWR fuel assemblies has been carried out using the Fluent code to verify the reliability of analysis method and procedure. And the temperature distribution for storage cask loaded with 24 metalized fuels equivalent to 96 PWR fuels has been also calculated. It is found that the storage volume of PWR assembly is reduced to a quarter and the heat load is reduced to a half by the preferential elimination of Sr-90 and Cs-137 through the metalization process of spent PWR fuel. Total decay heat from 24 spent PWR fuels and 24 metalized spent fuels are 28 kW and 54 kW, respectively. The calculated temperatures for 24 spent PWR fuels were compared with the proven data presented from the safety analysis report of spent fuel storage cask. It has good agreement between the two results, and it is also found that the feasibility of the analysis method and procedure has been confirmed by the results to estimate the temperature for the spent fuel storage cask. The maximum fuel temperature for 24 metalized spent fuel assemblies inside the cask is calculated at 617 °C.

## 1. 서 론

원자력연구소에서는 사용후핵연료 차세대 관리기술의 하나로 현재 가압경수로에서 발생하고 있는 사용후핵연료를 건식 개질함으로서 그 관리부피를 초기대비 1/4로 줄이고 관리 안전상에 문제를 일으키는 고 방열성 핵종인 세슘과 스트론튬을 선택적으로 제거하여 냉각 부하를 1/2로 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 관한 연구를 수행하고 있다[2]. 부피를 1/4로 줄이면 저장용량을 4배로 확장할 수 있으나 냉각부하는 약 2배로 커져 내부 핵연료 및 저장시스템에 대한 열적 건전성 평가가 요구된다. 건식저장시스템의 열해석 목적은 저장시스템 내부의 유량 및 온도분포를 결정하고 핵연료봉의 최대온도가 규정치를 넘지 않는 것을 입증하는데 있다.

본 연구에서는 범용 열유동 해석 프로그램인 Fluent 코드[2]를 이용하여 사용후핵연료 콘크리트 저장용기의 열유동해석을 수행하여 해석방법 및 절차를 수립하였으며, 또한 사용후핵연료 금속저장체를 고려할 경우 온도분포를 계산하였다. Fluent 코드는 미국의 Fluent사에서 개발된 CFD(computational fluid dynamics) 해석코드로서 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종의 보존방정식을 기반으로 하는 범용 유동해석 코드로서 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하고 있다.

## 2. Fluent 코드 개요

Fluent는 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종의 보존방정식을 기반으로 하는 범용 유동해석 코드로서 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하고 있다. 이와 같은 CFD 코드는 유동 및 열전달, 물질전달 및 화학반응 문제 등에 대한 해석할 수 있으며, 압축성, 비압축성 유동해석이 가능하고 자동차 산업, 전자장비 냉각계통, 열교환기 및 furnace 등의 해석에 널리 사용되고 있다.

Fluent 코드는 4각형 및 육면체 형태의 정렬격자만 뿐만 아니라 삼각형, 사면체, 피라미드 및 프리즘 형태의 비정렬격자도 사용함으로써 복잡한 형상을 쉽게 구현할 수 있다. 이 코드에서는 압축성 및 비압축성 유동, 층류 및 난류유동, conjugate 열전달, inert partial motion, 화학반응 문제에 대한 해석모델 및 복사열전달, 정상상태 및 과도상태 해석, 상변화 및 다상 유동에 대한 해석모델을 제공하고 있다.

프로그램은 크게 전처리 프로그램인 Geomesh와 솔버인 Fluent로 구성되며, Geomesh를 통하여 해석하고자 하는 대상의 2차원/3차원 형상에 따른 형상을 모델링을 하고 격자를 만든다. 전처리 과정에서 생성된 격자를 솔버인 Fluent로 읽어 들여 해석하고자 하는 대상의 열유동해석을 수행한다. 솔버에서는 추가적인 격자를 만들 수 있고, 문제의 성격(층류 혹은 난류, 정상 혹은 비정상 상태 등)을 정의하고, 해석모델을 설정한다. 또한, 계산에 필요한 물성치(밀도, 점성계수, 열전도 등) 및 경계조건(대류, 복사, 온도, 속도 및 압력 등) 등을 지정하여 해석을 수행하고 해석결과를 평가할 수 있다. 후처리 프로그램은 별도로 없고 솔버 자체에 후처리 기능이 포함되어 있다. 그래픽 기능을 사용하여 계산된 유동 및 온도장 등을 입체적으로 나타낼 수 있으며, 애니메이션 기능도 포함되어 있다.

### 3. 이론적 배경

유동해석에서는 Navier-stokes 방정식을 풀게 되며, 열전달이 없는 층류유동인 경우에는 질량 및 운동량 보존방정식이 적용된다. 열전달이 있는 유동에서는 질량 및 운동량방정식 그리고 에너지 보존방정식을 풀게 된다. 또한, 화학반응이 있는 문제에서는 화학종 보존방정식을 풀게 되며, 이들에 대한 지배방정식은 다음과 같이 표현된다,

#### 질량 보존방정식

질량 보존방정식은 식(1)과 같이 미분방정식으로 표현되며, 비압축성 유동 및 압축성유동에 적용될 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \text{----- (1)}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $u_i$ 는  $i$ 방향의 속도,  $S_m$ 은 화학반응 등에 의한 소스 항,  $t$ 는 시간 그리고  $x_i$ 는  $i$ 방향의 공간좌표계를 나타낸다. 첫째 항은 유체에 유입되는 질량의 율이고 두 번째 항은 유체로부터 질량의 유출율이다.  $S_m$ 은 상변화 등으로 인하여 발생하는 질량의 변화율을 나타낸다.

#### 운동량 보존방정식

난류유동 또는 열전달이 있는 유동해석에서 적용되는 운동량 보존방정식은 식(2)와 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \text{----- (2)}$$

여기서  $p$ 는 정압,  $\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$ 는 stress tensor,  $g_i$ 는  $i$ 방향의 중력가속도 그리고  $F_i$ 는  $i$ 방향의 외력을 나타낸다. 좌변의 첫 번째 항은 운동량이 축적되는 비율이고 두 번째 항은 운동량의 유출율을 나타낸다. 우변은 유체에 가해지는 외력의 합으로 표현되며, 압력, 점성력, 중력 및 기타 외력의 합으로 나타낼 수 있다.

#### 에너지 보존방정식

에너지 보존 방정식은 식(3)에서와 같이 유체에 에너지가 들어와서 축적되는 비율과 유출되는 율을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum h_j V_j \\ &+ \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_h \text{----- (3)} \end{aligned}$$

여기에서  $h$ 는 정엔탈피,  $T$ 는 온도,  $V_j$ '는 화학종  $j$ '의 flux,  $k$ 는 열전도도 그리고  $S_h$ 는 화학반응, 복사 등에 의한 엔탈피 소스 항을 나타낸다. 우변은 에너지가 들어왔다 빠져나감으로 발생하는 열전도를 통한 온도변화, 엔탈피의 변화, 압력의 변화율을 나타낸다. 여기에서

$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$  항은 유체의 속도가 아주 커서 마찰로 인한 열발생 효과가 있을 때 적용 될 수 있으며,  $S_h$ 는 고체에서 열발생 등으로 인한 에너지의 증가를 나타낸다.

**화학종 보존방정식**

화학반응이 있는 유동해석에 적용되는 화학종의 보존방정식은 대류-확산 방정식을 풀음으로서 각 화학종의 질량 분류(mass fraction)를 계산할 수 있으며, 지배방정식은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(V_{i,j}) + S_i \quad \text{----- (4)}$$

여기서  $Y_i$ 는 화학종  $i$ 의 질량 분율,  $V_{i,j} = -\rho D_{ij} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j}$ 는 화학종  $i$ 의 확산 질량 flux,  $S_i$ 는 화학반응 등에 의한 화학종  $i$ 의 소스 항 그리고  $D_{ij}$ 은 화학종  $i$ 의 확산계수를 나타낸다. 좌변은 mass fraction의 변화율을 나타내며, 우변은  $R_i$ 는 화학반응에 의해 증가 또는 감소되는 질량을 나타내며, 상변화 등으로 인한 생성률을 나타낸다.

열유체 현상을 지배하는 이상의 기본방정식은 밀도, 점성계수, 열전도도, 질량 확산계수(mass diffusion coefficient), 비열 등의 열물성치를 포함하고 있다. 온도가 넓은 범위에 걸쳐서 변하고 화학반응이 존재하는 경우 이러한 열물성치는 일반적으로 온도 및 화학종의 함수로서 나타낼 수 있다.

**4. 콘크리트 저장용기 열해석**

해석모델은 24개의 PWR 사용후핵연료 집합체를 장전할 수 있는 HI-STORM 100[3] 콘크리트 저장용기를 적용하였으며, 24개의 PWR 사용후핵연료집합체 및 96개의 PWR 사용후핵연료를 금속전환 시킨 24개의 금속저장체를 장전시키는 경우로 하였다. 설계기준 핵연료로는 연소도 43,000 MWD/MTU, 냉각기간 5년인 PWR 핵연료집합체를 기준으로 하여 24개의 PWR 핵연료집합체에서의 붕괴열은 28 kW, 96개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 24개 금속저장체의 붕괴열은 54 kW로 고려하였다.

그림 1은 해석모델의 단면을 나타내고 있다. 저장용기의 핵연료집합체 및 핵연료 장전통, 밀봉 캐니스터, 그리고 콘크리트 오버팩을 하나의 해석모델로 구성하기 위하여 단순화시킨 모델을 사용하였다. 밀봉 캐니스터 내부에는 24개의 PWR 핵연료 및 핵연료를 장전하기 위한 장전통이 설치되며, 해석모델에서는 24개의 핵연료 및 장전통과 동일한 체적을 갖도록 등가반지름으로 환산하여 핵연료 및 장전통 영역을 설정하였다. 24개 각각의 핵연료 장전통 상하부에는 내부 유체 순환을 통한 자연냉각을 위한 hole이 있으며, 해석모델에서도 동일한 면적을 갖도록 hole을 구성하여 상하부가 관통되도록 하였다. 밀봉 캐니스터 내부에는 불활성 기체인 헬륨가스를 고려하였으며, 헬륨가스가 핵연료 장전통 내부를 순환하여 자연냉각되도록 하였다. 밀봉 캐니스터와 콘크리트 오버팩 사이에도 외부 공기 순환에 의한 자연냉각이 일어나도록 상하부가 관통되도록 하였다.

그림 2는 Fluent 코드 해석모델을 나타내며, 하나의 모델로 콘크리트 오버팩, 캐니스터 및 핵연료 등을 묘사하기 위해서는 3차원 모델로는 한계가 있어 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 용기 내부 및 외부에서는 대류 및 복사열전달이 일어나는 것으로 모델링하였다.

콘크리트 저장용기의 자연대류에 대한 용기내의 유동이 난류영역으로 확대되며, 난류모델은 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 용기 주변의 대기온도는 상온인 27 °C로 하였으며, 내부로 유입되는 공기의 온도도 27 °C로 하였다. 용기 외부 표면에서 자연대류 열전달 관계식은 저장용기와 같이 가열된 수직면에서 일반적으로 다음과 같은 보수적인 식을 적용한다[4].

층류영역 :

$$h = 1.3 (\Delta T)^{1/4} (Gr \times Pr) > 10^9 \text{ ----- (5)}$$

난류영역 :

$$h = 1.4 (\Delta T/L)^{1/4} (Gr \times Pr) < 10^9 \text{ ----- (6)}$$

$$h = 1.3 (\Delta T/L)^{1/4} (Gr \times Pr) < 2 \times 10^7 \text{ ----- (7)}$$

위 식에서 ΔT는 용기 외부 표면과 주변 대기와의 온도차이며, L은 용기의 길이를 나타낸다. 저장용기 주변은 난류영역이므로 자연대류 열전달은 식(5)를 적용하였으며, 용기 외부표면에서 대류 및 복사열전달은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$q = 1.3 (\Delta T)^{4/3} + \sigma \epsilon F (Ts^4 - Ta^4) \text{ ----- (8)}$$

σ = Stefan-Boltzmann constant (5,669 × 10<sup>-8</sup> W/m K<sup>4</sup>)

Ts, Ta = surface and ambient temperatures (K)

q = surface heat flux (W/m<sup>2</sup>)

ε = surface emissivity

F = view factor between surface and air

용기 외부표면은 내방사성 페인트로 도색 처리되어 있으며, 도색된 표면은 방사율이 높아지는 이점이 있다. 도색 표면에 대한 방사율은 일반적으로 0.8 ~ 0.98[5] 값을 가지며, 콘크리트 저장용기 표면에서의 방사율은 0.8을 적용하였다.

그림 3은 24개의 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우에 대한 콘크리트 저장용기의 온도분포를 나타내며, 핵연료의 최고온도는 356 °C로 나타났다. 캐니스터 및 콘크리트 오버팩 사이의 공기에 의한 자연대류, 그리고 캐니스터 내부의 헬륨가스에 의한 자연대류가 일어나지만 길이 방향으로 볼 때 거의 상하 대칭의 온도분포를 보이고 있다. 이것은 용기 내부에서 자연대류보다는 복사가 열전달에 더 큰 영향을 끼쳐서 나타난 결과이다. 표 1에는 열해석 결과와 HI-STORM 100 System의 안전성분석보고서에서 제시한 결과를 비교하여 나타내고 있다. 캐니스터 및 콘크리트의 온도는 10 °C 이내의 차이로 두가지 결과가 서로 잘 일치하였다. 핵연료의 온도는 계산 결과가 약 24 °C 정도 높게 나타났으며, 이것은 복잡한 형상을 갖는 내부 핵연료집합체 및 핵연료 장전통 등을 등가반지름으로 단순화시키는 과정에서 발생된 오차라 판단되며, 전체적으로 오차범위 10% 이내로 만족스런 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 해석에서 적용한 해석모델, 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다.

그림 4는 24개의 금속저장체를 장전할 경우에 대한 온도분포를 나타내며, 콘크리트 오버팩 외벽 및 내벽의 최고온도는 145 °C 및 277 °C로 나타났다. 또한 핵연료의 최고온도는 617 °C로서 24개의 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우의 357 °C보다 훨씬 높게 나타났다. 따라서 열적 건전성 측면으로 볼 때 24개의 PWR 핵연료를 장전할 수 있는 콘크리트 저장용기에 약 2배의 붕괴열을 갖는 금속저장체를 수용하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Comparison of Temperature between the Calculated Result and Reference Value

Location	Maximum temperature (°C)	
	Calculated value	Reference value
Spent fuel	357	333
Canister outer shell	220	222
Concrete overpack inside	132	129
Concrete overpack outside	72	63

## 5. 결 론

본 연구에서는 Fluent 코드를 이용하여 콘크리트 저장용기에 대한 열해석을 수행하였다. 해석모델은 24개의 PWR 사용후핵연료집합체 저장용량을 갖는 기존의 콘크리트 저장용기를 적용하였으며, 24개의 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우에 대하여 해석을 수행하여 해석결과와 용기의 안전성분석보고서에 제시된 온도 값을 서로 비교함으로써 해석결과에 대한 신뢰성을 평가하였다. 해석결과가 콘크리트 저장용기 안전성분석보고서에서 제시하는 온도 값과 서로 잘 일치하였으며, 따라서 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다. 또한, 24개의 PWR 핵연료집합체 대신에 약 2배의 냉각부하를 갖는 24개의 금속저장체를 장전할 경우에 대한 온도분포를 계산하였으며, 핵연료의 최대온도는 617 °C로 나타났다. 따라서 기존의 콘크리트 저장용기에 24 PWR 핵연료집합체의 4배 저장용량을 갖는 금속저장체를 장전하는 것은 불가능할 것으로 판단되며, 향후에는 기존의 다른 저장방식에 대한 금속저장체 적용성을 평가할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] 노성기 외, "사용후핵연료 차세대관리 공정개발", 한국원자력연구소 KAERI/TR-994/98, 1998.
- [2] FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5, Fluent Inc., 1998.
- [3] Holtec Report HI-951312, "Topical Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 System", Rev. 1, 1997.
- [4] Jakob M. and Hawkins G.A., "Elements of Heat Transfer", John Wiley & Sons, New York, 1957.
- [5] Kern D.Q., "Process Heat Transfer", McGraw Hill Kogakusha, 1980.

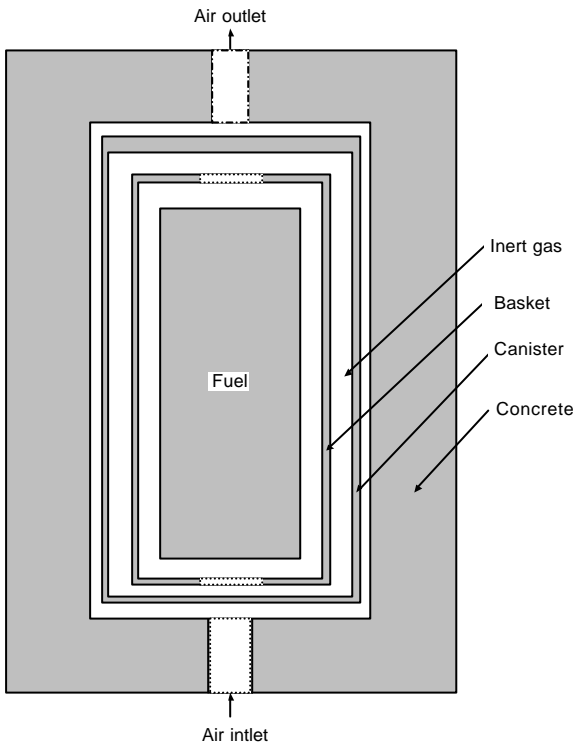


Fig. 1. Cross section of Analysis Model.

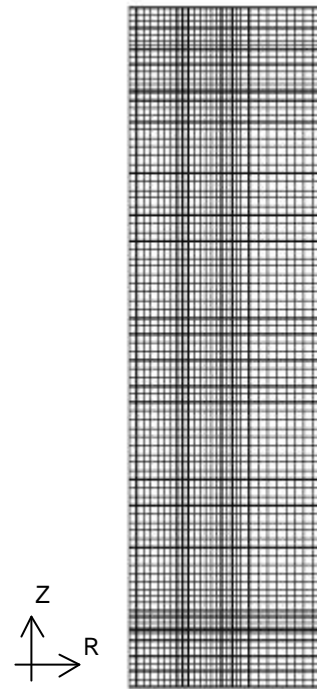


Fig. 2. Fluent Analysis Model.

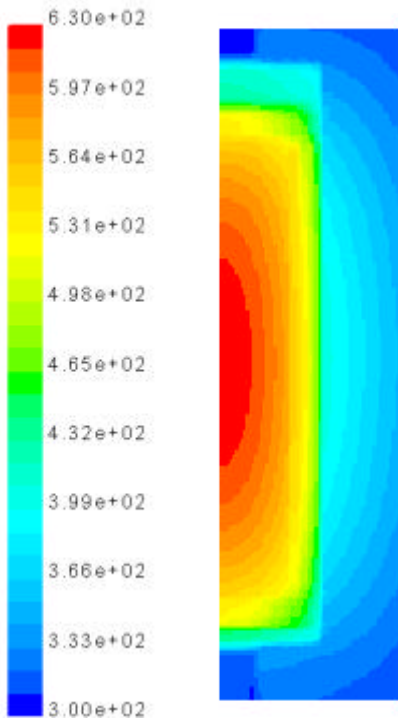


Fig. 3. Temperature Contour for PWR Fuels.

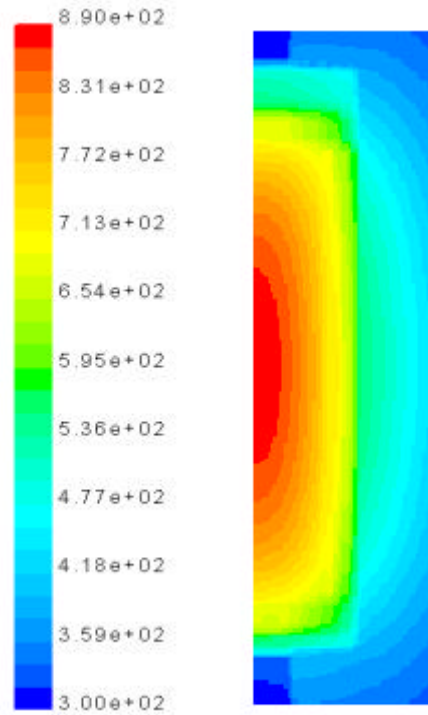


Fig. 4. Temperature Contour for Metalized Fuels.