

Heat Transfer Analysis around Transport Cask under Transport Hood

사용후핵연료 운반용기 덮개 내부 열전달 해석

Dong-Gyu Lee¹⁾, Jae-Ho Park, In-Su Jung, Tae-Man Kim* and Jeong-Hyun Yoon*

Korea Nuclear Engineering & Service Corp. 341-4 Jangdae-dong, Yuseong-gu, Daejeon

*Korea Radioactive Waste Management Corporation, 1045 Deadeokdae-ro, Yuseong-gu Daejeon

이동규¹⁾, 박제호, 정인수, 김태만*, 윤정현*

(주)코네스코퍼레이션, 대전시 유성구 장대동 341-4

*한국방사성폐기물관리공단, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received February 16, 2011 / Revised March 31, 2011 / Approved August 29, 2011)

Abstract

In case that the maximum temperature of any surface readily accessible during transport of a spent nuclear fuel (SNF) transport cask exceeds 85°C in the absence of insolation under the ambient temperature of 38°C, personnel barriers or transport hood shall be used to prevent people from casual contact with the transport cask surface. Usually the air temperature within the hood and the hood surface temperature are calculated and further utilized as boundary conditions (free stream temperature and external radiation temperature) for thermal evaluation under normal conditions of transport. In this study, these temperatures are derived using the analytical method based on the heat transfer mechanism around the transport cask under transport hood assuming the thermal equilibrium. By comparing the analytical solutions with the results from the detailed calculations with CFD-computer-code FLUENT 12.1 it is verified that the analytical method is still efficient tool to estimate the temperatures and these temperatures can be further used as boundary conditions for thermal evaluation under normal conditions of transport.

Key words : Spent Nuclear Fuel Transport Cask, Transport Hood, Heat Transfer, Natural Convection, Air Flow

요 약

사용후핵연료 운반용기 표면온도가 85°C를 초과할 경우, 대인용 보호막(Personnel Barrier) 또는 운반용 덮개(Transport Hood)를 설치하여 운반 중 운반용기 표면에 사람이 직접 접근할 수 없도록 하여야 한다. 운반용 덮개가 설치된 경우, 열적 안전성 평가의 한 가지 경우인 정상조건 열해석 시, 외부환경 경계조건(환경온도 및 외부복사온도)으로 적용하기 위해서 운반용 덮개 내부 열 환경 조건(내부 공기온도 및 운반용 덮개 표면온도)을 계산해야 한다. 따라서 본 연구에서는 운반용 덮개 내부 공기온도 및 표면온도를 계산하기 위한 해석적 방법 및 열전달 특성에 대한 분석을 수행하였고 CFD 해석 결과와 비교를 통해 타당성을 검증하였다.

중심단어 : 사용후핵연료 운반용기, 운반용 덮개, 열전달, 자연대류, 공기유동

1) Corresponding Author. E-mail : dglee@kones21.com

I. 서 론

사용후핵연료 운반용기는 안전성 확보를 위해 정상조건 및 사고조건에 대한 열적 건전성을 입증하도록 법적 요건으로 규제하고 있다[1,2]. 열적 건전성 입증은 대부분 전산해석을 통해 이루어지고 있으며 전산해석 결과의 타당성 검증을 위해 안전성 시험을 수행하고 있다. 운반용기가 외부환경에 직접 노출된 경우, 전산해석을 통한 정상조건 열해석은 외부 경계조건으로 일사량 조건 및 38℃ 외기온도를 적용한다. 그러나 교육과학기술부고시 제2009-37호에 의하면, 일사량이 없고 38℃ 외기온도 조건에서 사용후핵연료 운반용기 표면온도는 85℃ 이하로 유지되어야 하며 85℃를 초과할 경우, 대인용 보호막(Personnel Barrier) 또는 운반용 덮개(Transport Hood)를 설치하여 운반 중 운반용기 표면에 사람이 직접 접근할 수 없도록 하여야 한다[1]. 이와 같이 운반용 덮개가 설치된 경우, 운반용기는 외부환경에 직접 노출되지 않기 때문에, 정상조건 열해석 시 외부환경 경계조건(환경온도 및 외부 복사온도)으로 적용하기 위한 운반용 덮개 내부 열환경 조건(내부 공기온도 및 운반용 덮개 표면온도)을 계산해야 한다.

기존 사용후핵연료 운반용기 덮개 내부 열전달 해석은 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 방법에 의해 계산하였으며 단순모델과의 비교를 통해 계산방법의 타당성을 검증하였다[3]. 여기에서 제시한 단순모델은 각 표면에서의 대류열전달 계수를 표면온도 및 주변 공기온도의 함수로 고려하지 않고 일정한 상수로 설정하였으며 복사열전달을 고려하지 않았기 때문에 이에 대한 보완이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 운반용 덮개 내부 공기 온도 및 운반용 덮개 표면 온도를 계산하기 위한 해석적 방법을 제시하고 해석결과의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 운반용 덮개 형상 및 제원

사용후핵연료 운반용기의 운반용 덮개는 운반차량 트레일러에 장착되어 있고, 운반용 프레임에 방수천(타폴린, tarpaulin)이 씌워져 있는 형태이다. 운반용 덮개는 운반용기를 적재하기 위해서 운반차량 트레일러 축을 기준으로 개폐가 가능하도록 전후로 움직일 수 있다. 운반용 덮개에는 덮개 내부 공기가 운반용기로부터 방출된 열에 의해 가열되는 것을 방지하기 위해서 측면 상하부에 공기 입/출구가 존재한다 [4]. 이러한 공기 입/출구를 통해 외부 공기가 운반용 덮개 내부로 유입되어 공기 출구를 통해 외부로 빠져 나감으로서 운반용기에서 방출된 열을 제거한다. 본 논문에서 적용한 운반

용기는 사용후핵연료 21다발을 운반하기 위해서 직경이 2.35 m이고 길이는 충격완충체를 포함하여 6.675 m이며 내부 사용후핵연료의 붕괴열은 16.72 kW이다. 운반용 덮개는 대략 폭 4.3 m, 높이 4.2 m이고 공기 입/출구의 높이는 각각 0.6 m이다. 상세한 운반용 덮개 제원을 Fig. 1에 제시하였다.

운반용 덮개의 실제의 길이는 운반차량 트레일러 길이와 거의 동등하며 충격완충체를 포함한 운반용기 길이보다 길다. 그러나 본 연구에서는 계산을 단순화하기 위하여 충격완충체를 제외한 운반용기의 노출 표면 길이인 4.335 m을 고려하였다.

III. 수학적 모델 및 해석방법

운반용 덮개 표면온도 및 덮개내 공기온도 계산은 덮개표면에 입사하는 일사량을 고려하여 운반용기, 운반용 덮개 및 외부환경과의 열평형에 근거한다. 운반용기 및 운반용 덮개 내·외부에서의 열전달 모드를 Fig. 2에 제시하였으며 이러한 열전달 모드에 대한 열평형 방정식을 도출하여 덮개 내부공기 온도 및 덮개 표면온도를 계산할 수 있다.

계산모델은 다음과 같은 가정과 경계조건을 적용하였다[3].

- 열은 충격완충체를 제외한 표면을 통해 대류 및 복사에 의해 전달된다.
- 운반용기에 의해 전달된 복사열의 흡수는 운반용 덮개의 수직면 또는 상부면에서 이루어지고 하부면 즉, 운반차량에서의 흡수는 고려하지 않는다.
- 용기표면 및 운반용 덮개 표면으로부터의 대류열전달은 덮개내 공기의 자연대류에 의해 이루어진다.

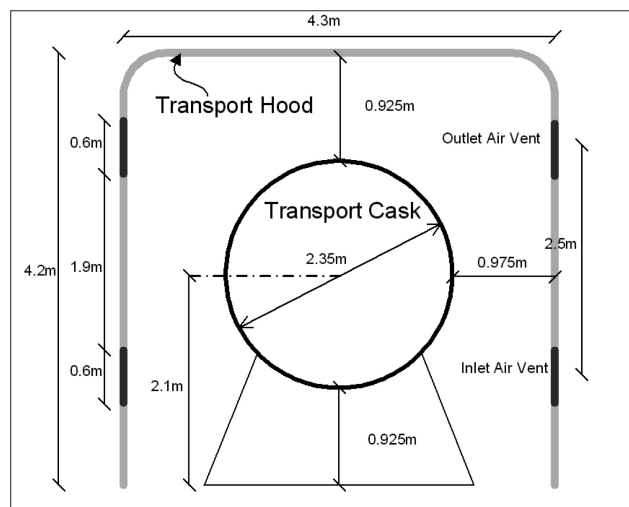


Fig. 1. Geometry and Configuration of Transport Hood for the Spent Nuclear Fuel Transport Cask.

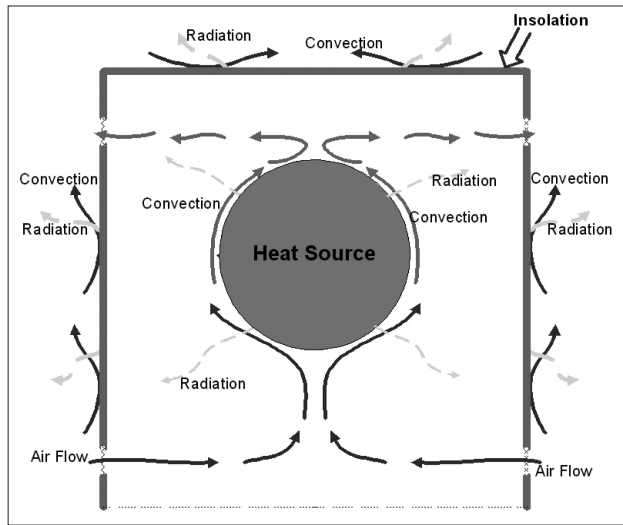


Fig. 2. Heat Transfer Modes and Characteristics around Spent Nuclear Fuel Transport Cask under Transport Hood.

- 운반용 덮개 외부표면에서부터 외부환경으로의 열전달은 복사 및 대류에 의해 이루어진다.
- 운반용 덮개 외부표면에서의 대류열전달은 보수적 계산을 위해 바람 등과 같은 영향은 무시한다.

운반용 덮개 표면온도 및 공기온도를 계산하기 위해서 다음과 같은 열평형 방정식을 적용하였다.

■ 운반용기 :

$$Q_D = Q_{C,C} + Q_{R,C} \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, Q_D 는 사용후핵연료 붕괴열(W), $Q_{C,C}$ 는 운반용기의 대류열전달(W), $Q_{R,C}$ 는 운반용기와 덮개 사이의 복사열전달(W)을 나타낸다.

■ 운반용 덮개 :

$$Q_{R,C} + Q_S = Q_{C,H,i} + Q_{C,H,o} + Q_{R,H} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, Q_S 는 덮개에 적용되는 일사량(W), $Q_{C,H,i}$, $Q_{C,H,o}$ 는 각각 덮개 내부표면 및 외부표면으로부터 대류에 의한 열전달(W), $Q_{R,H}$ 는 덮개 외부표면으로부터 환경으로의 복사 열전달(W)을 나타낸다.

■ 공기유동 :

$$Q_{C,H,i} + Q_{C,C} = Q_A \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta P_{Lift} = \Delta P_{Loss} \dots\dots\dots (4)$$

여기에서, Q_A 는 공기에 의한 열전달(W), ΔP_{Lift} 는 열전

달에 의한 부력(N/m²), ΔP_{Loss} 는 공기 유동에 의한 압력손실(Pa)을 나타낸다.

가. 대류열전달(Convective Heat Transfer)

운반용기 및 운반용 덮개 표면에서 발생하는 대류열전달은 식(5)~식(6)에 의해 표현 가능하다.

$$Q_{C,C} = h_C \cdot A_C \cdot (T_C - \frac{T_i + T_o}{2}) \dots\dots\dots (5)$$

여기에서, h_C 는 운반용기 표면 대류열전달 계수(W/m² · K), A_C 는 운반용기 표면적(m²), T_C 는 운반용기 표면온도(°C), T_i 는 운반용 덮개 입구온도(°C)이고 T_o 는 운반용 덮개 출구온도(°C)를 나타낸다.

$$Q_{C,H,i} = h_{H,i} \cdot A_H \cdot (T_H - \frac{T_i + T_o}{2}) \dots\dots\dots (6)$$

여기에서, $h_{H,i}$ 는 운반용 덮개 내부표면 대류열전달 계수(W/m² · K), A_H 는 운반용 덮개 표면적(m²), T_H 는 운반용 덮개 표면온도(°C)를 나타낸다.

$$Q_{C,H,o} = h_{H,o} \cdot A_H \cdot (T_H - T_A) \dots\dots\dots (7)$$

여기에서, $h_{H,o}$ 는 운반용 덮개 외부표면 대류열전달 계수(W/m² · K), T_A 는 외기온도(38°C)를 나타낸다.

운반용기 및 운반용 덮개 표면에서의 대류열전달 계수는 다음 식에 의해 계산되며 가열 표면 형태 및 위치에 따른 상수값은 Table 1에 제시하였다[5].

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^m \dots\dots\dots (8)$$

여기에서, Nu 는 Nusselt Number이고 Gr 은 Grasshof Number이며 Pr 은 Prandtl Number를 나타낸다. Grasshof Number는 다음과 같이 정의된다.

$$Gr = \frac{g\beta(T_H - T_{air})L^3}{\nu^2} \dots\dots\dots (9)$$

Table 1. Constants for Isothermal Surfaces Related to Equation (8).

Geometry	C	m
Cask Surface	0,125	1/3
Inner Horizontal Surface of Transport Hood	0,27	1/4
Inner Vertical Surface of Transport Hood	0,1	1/3
Outer Horizontal Surface of Transport Hood	0,15	1/3
Outer Vertical Surface of Transport Hood	0,1	1/3

여기에서 g 는 중력가속도(m/s^2), β 는 열팽창계수(K^{-1}), T_{air} 는 운반용 덮개 내부 공기온도($^{\circ}C$), L 은 운반용 덮개 특성길이(m)를 나타내며 ν 는 공기의 동점성계수(m^2/s)를 나타낸다.

공기의 모든 물성치는 운반용기 표면온도와 외기온도의 평균온도를 적용하였으며 Table 2에 나타냈다[6].

나. 복사열전달(Radiative Heat Transfer)

운반용기 표면과 운반용 덮개 내부면 사이 및 운반용 덮개 외부면과 외부환경과의 복사열교환은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{R,C} = \frac{\sigma A_C (T_C^4 - T_H^4)}{\frac{1}{\epsilon_C} + \frac{A_C}{A_H} \left(\frac{1}{\epsilon_H} - 1 \right)} \dots\dots\dots (10)$$

$$Q_{R,H} = \epsilon_H \sigma A_H (T_H^4 - T_A^4) \dots\dots\dots (11)$$

여기에서, σ 는 스테판-볼츠만 상수($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), ϵ_C , ϵ_H 는 운반용기 및 덮개 표면 방사율을 나타낸다.

다. 일사량(Solar Insolation)

일사량은 수직면 및 수평면에 따라 적용되는 값이 다르며 다음 식에 의해 계산된다.

$$Q_S = \alpha_H (Q_{S,v} \cdot 2 \cdot A_{H,v} + Q_{S,h} \cdot A_{H,h}) \dots\dots\dots (12)$$

여기에서, α_H 는 덮개 표면의 일사량 흡수율, $Q_{S,v}$, $Q_{S,h}$ 는 운반용 덮개의 수직면 및 수평면에 적용되는 일사량의 Heat Flux Density(W/m^2), $A_{H,v}$, $A_{H,h}$ 는 덮개의 수직면 및 수평면 면적(m^2)을 나타낸다.

라. 운반용 덮개 내부 공기 유동

운반용 덮개 공기 입/출구를 통한 공기 유동은 덮개 내에서 공기가열의 결과로부터 발생한다. 덮개내 공기의 밀도는 외부환경 공기의 밀도보다 낮다. 부력 및 덮개의 상부 및 하

Table 2. Air Properties within Transport Hood.

Temperature [K]	Thermal Conductivity [W/mK]	Viscosity [m ² /s]	Prandtl Number
300	0.025956	0.0000156	0.7146
320	0.027531	0.0000177	0.7106
340	0.029106	0.0000197	0.7066
360	0.030681	0.0000218	0.7026
380	0.032256	0.0000238	0.6986
400	0.033831	0.0000258	0.6946

부 공기 입/출구 때문에 공기는 덮개를 통해 유동하게 된다.

$$Q_A = \dot{m}_A c_{P,A} (T_o - T_i) \dots\dots\dots (13)$$

여기에서, \dot{m}_A 는 덮개를 통한 공기유량(kg/sec), $c_{P,A}$ 는 공기의 비열($J/kg \cdot K$)을 나타낸다.

덮개를 통한 공기유량을 결정하기 위해서 열평형 방정식 외에 추가적인 부력 및 압력손실에 의한 유체역학적 평형 방정식을 풀어야 한다. 부력은 다음 식에 의해 계산된다[7].

$$\Delta P_{Lift} = \int_0^h \frac{T(x) - T_A}{T_A} \rho_A g dx \dots\dots\dots (14)$$

여기에서, $T(x)$ 는 운반용 덮개 높이에 따른 온도($^{\circ}C$), ρ_A 는 온도 T_A 에서 공기밀도(kg/m^3), g 는 중력가속도($9.81m/s^2$), h 는 공기입구/출구 사이의 높이차(m)를 나타낸다.

형태인자(Form Factor), ϕ 에 의해서 식(13)은 다음과 같이 표현될 수 있다. 여기에서 형태인자를 적용하여 입구/출구 사이의 운반용 덮개 내 온도분포를 묘사할 수 있다.

$$\Delta P_{Lift} = \phi \frac{T_o - T_A}{T_A} \rho_A g h \dots\dots\dots (15)$$

운반용기는 덮개 공기 입/출구의 중간에 위치해 있으므로 $\phi=0.5$ 를 적용하였다[8]. 공기유동에 의한 압력손실은 공기 입/출구에서 발생하고 다음 식에 의해 계산될 수 있다[9].

$$\Delta P_{Loss} = \zeta_{Loss} \frac{\rho_o w_o^2}{2} \dots\dots\dots (16)$$

여기에서, ζ_{Loss} 는 공기유동에 대한 항력계수이며 본 논문에서는 0.4를 적용하였다[7]. ρ_o 는 공기출구에서의 공기밀도, w_o 는 공기출구에서의 속도를 나타낸다.

이상에서 운반용 덮개 내부 공기온도 및 표면온도를 계산하기 위한 해석적 방법을 제시하였으며 운반용 덮개 제원 외에 계산을 위한 입력값은 Table 3과 같다[1,3,4].

Table 3. Input Data used for Calculation of the Hood Surface Temperature and Internal Air Temperature under Transport Hood.

Inputs	Values
Decay Heat [kW]	16.72
Insolation on Horizontal Surface [W/m ²]	800
Insolation on Vertical Surface [W/m ²]	200
Emissivity of Transport Cask Surface	0.8
Emissivity of Transport Hood Surface	1.0
Absorptivity of Transport Hood Surface	1.0
Form Factor	0.5
Drag Coefficient	4.0
Ambient Temperature [°C]	38

IV. 해석결과 및 분석

운반용 덮개 내부 온도와 외기온도 차에 따른 밀도차로 인하여 운반덮개 내부로 공기 유동이 발생하며 덮개 측면에 설치된 공기 입/출구를 통해 외기와 열교환이 이루어진다. 이러한 환경조건에서 운반용 덮개 내부 공기온도 및 덮개 표면온도는 사용후핵연료 운반용기 정상조건 열해석시 경계조건으로 입력되는 중요한 변수이다. 덮개 내부 공기온도 및 덮개 표면온도를 계산하기 위해서는 미지수가 T_C , T_H , T_o , w_o 로 이루어진 열평형방정식 및 유체역학적 평형방정식(식(1)~식(4))을 동시에 풀어야 한다. 그러나 운반용기 표면 및 운반용 덮개 표면에서의 열전달계수가 각 표면 및 내부 공기 온도의 함수이므로 T_C , T_H , T_o 를 초기값으로 가정하여 열전달계수를 구하고 난 다음 구하고자 하는 각 온도를 갱신하는 반복법에(Iterative Method)에 의한 계산과정을 거쳐야 한다. 본 논문에서는 이러한 온도를 계산하기 위한 방법론을 제시하였고 계산결과를 Table 4에 나타내었다. 계산결과, 운반용 덮개 내부 온도는 44.8℃, 덮개 표면온도는 67.9℃로 계산되었으며 운반용 덮개 공기 출구에서의 속도는 0.37 m/sec로 평가되었다. 계산된 온도는 정상조건 열해석시 경계조건으로서, 운반용기 표면 대류열전달을 위한 환경온도(Free Stream Temperature)와 운반용기 표면과 운반용 덮개 표면과의 복사열전달을 위한 환경온도(External Radiation Temperature)로 적용된다. 해석 결과에 대한 전체 에너지 보존을 검토해 보면, 운반용기 표면에서 열교환은 용기 내부에서 발생열(붕괴열)이 16.72 kW이고 이 발생열은 대류열전달에 의해 9.624 kW, 복사열전달에 의해 7.096 kW가 내부 공기 및 운반용 덮개 표면과 열교환이 이루지고 열평형을 만족시킨다. 또한, 운반용 덮

Table 4. Heat Fluxes, Air Velocity and Temperatures Calculated with Analytical Method.

Heat Fluxes [kW]	
- Heat Transfer Rate from Transport Cask Surface	
· Convective Heat Transfer Rate	9,624
· Radiation Heat Transfer Rate	7,096
- Heat Transfer Rate from Transport Hood Surface	
· Convective Heat Transfer Rate (Inside)	6,674
· Convective Heat Transfer Rate (Outside)	7,636
· Radiation Heat Transfer Rate	12,901
- Heat Removal by Air Flow	16,298
Air Velocity [m/s]	
- Velocity at Outlet Vent	0,37
Temperature [℃]	
- Transport Cask Surface	95,3
- Transport Hood Surface	67,9
- Air Outlet Vent	45,4
- Internal Air(Average)	44,8

개 표면에서 열교환은 덮개 표면에서 받는 열이 27.21 kW (일사량 포함)이고 이 열은 대류 열전달에 의해 내부 공기 및 외부 환경으로 14.31 kW가 전달되며, 복사열전달에 의해서는 12.901 kW가 외부 환경으로 전달된다. 이러한 열교환은 열평형방정식(식(1)~식(3))을 만족시키며 열평형방정식에서의 최대 오차는 0.3%로 나타났다. 그리고 유체 역학적으로는 부력에 의한 압력손실 및 공기 입/출구에서의 압력손실 모두 0.3256 Pa로 계산되어 평형방정식(식(4))을 만족시킨다.

운반용 덮개 내부 공기온도 및 표면온도 계산 방법 및 결과를 검증하기 위해서 CFD 해석을 수행하였으며 CFD 결과와 비교하였다. CFD 계산은 FLUENT Version 12.1을 사용했으며 계산 모델은 1/2대칭, 2차원 사각형 격자(10,593개)를 이용하여 계산영역을 미소제어체적으로 분할하였으며 공간에 대하여 2차 상류차분법을 사용하였다. 난류모델은 k- ω SST를 적용하였고 자연대류 모델은 비압축성 이상기체법칙(Incompressible Ideal Gas Law)을 채택하였다. 경계조건으로는 운반용기 내부에 붕괴열에 해당하는 열원으로 정의하였으며 입구 및 출구는 pressure inlet 및 pressure outlet 조건을 부여하였고 그 외의 운반용기 덮개 내부표면은 wall 조건을 적용하였다. 또한 복사열전달을 계산하기 위해 전산해석 코드내의 DO모델을 적용하였다[10]. CFD 해석결과와의 비

Table 5. Comparison of Temperatures and Velocity Calculated with Analytical Method and CFD.

Location	Analytical Method	CFD
Transport Cask Surface Temperature	95.3 ℃	91.8 ℃
Transport Hood Surface Temperature	67.9 ℃	66.3 ℃
Transport Hood Outlet Vent Temperature	45.4 ℃	41.8 ℃
Internal Air Average Temperature	44.8 ℃	43.2 ℃
Internal Air Average Velocity	0.37 m/s	0.47 m/s

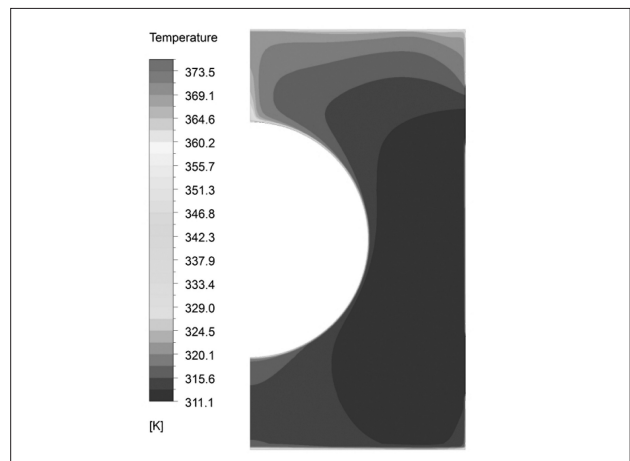


Fig. 3. Temperature Distribution from CFD Results.

교결과를 Table 5에 나타내었고 온도장 및 속도장은 Fig. 3 및 Fig. 4에 각각 제시하였다. 전반적으로, 해석값이 CFD 결과보다 높게 나타났으며 각 위치에서 1.6~3.6℃의 차이를 보였고 운반용 덮개 표면온도 및 내부 공기온도 결과 차이는 1.6℃로 거의 유사하게 나타났다. 또한 운반용기 내부 붕괴열 변화에 따른 운반용 덮개 표면 및 내부 공기온도에 대한 결과 비교를 Fig. 5에 제시하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 해석적 방법 및 결과는 타당한 것으로 판단되며 정상조건 열해석시 경계조건으로 적용가능함을 알 수 있었다. 또한, 본 논문에 제시한 계산 방법론 및 계산은 참고문헌 [3]에 제시한 기존 모델과 달리 각 표면에서의 대류열전달계수를 온도의 함수로 계산하였으며 기존모델은 운반용 덮개 내면에서의 복사열전달을 고려하지 않았으나 본 논문에서 제시한 방법론은 이를 보완하였다.

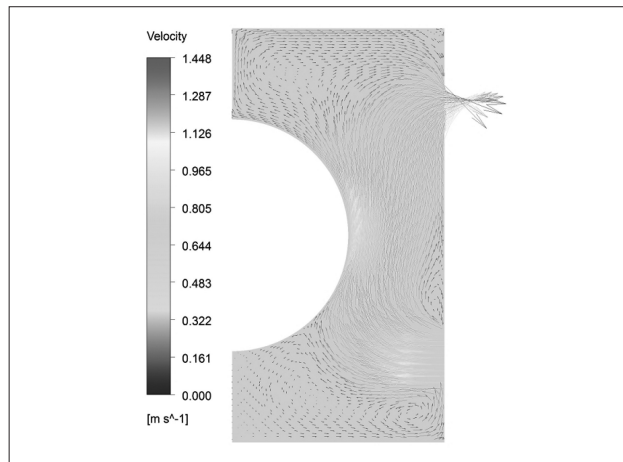


Fig. 4. Velocity Distribution from CFD Results.

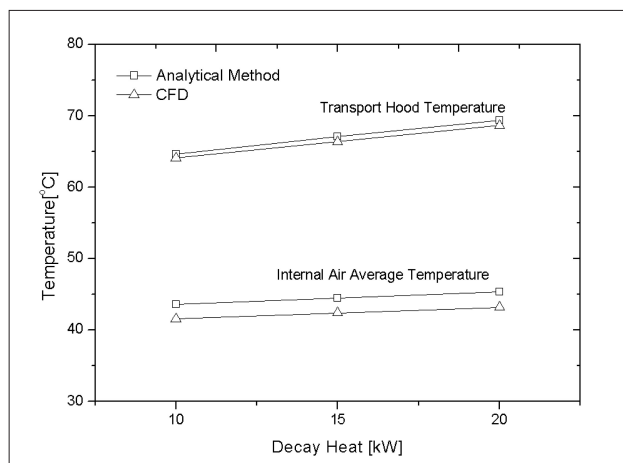


Fig. 5. Comparison of Hood Surface Temperature and Internal Air Temperature Calculated with Analytical Method and CFD by Decay Heat Variation.

V. 결론

본 논문은 사용후핵연료 운반용기 운반중 운반용 덮개가 설치된 경우, 열적 안전성 평가의 한 가지 경우인 정상조건 열해석시, 외부환경 경계조건(환경온도 및 외부복사온도)으로 적용하기 위해서 운반용 덮개 내부 열환경 조건(내부 공기온도 및 운반용 덮개 표면온도)을 계산하기 위한 방법 및 열전달 특성을 분석하였다. 계산결과는 열평형 방정식 및 유체역학적 평형방정식을 모두 만족하였고 CFD 결과와의 비교를 통해 계산 방법의 타당성을 검증하였다. 또한, 본 논문에서 제시한 모델은 기존 모델보다 운반용 덮개 내부 열전달 현상을 상세하게 다루었고 사용후핵연료 운반용기 열해석 시 운반용기 덮개 내부 공기온도 및 표면온도를 계산하기 위한 유용한 도구로 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 방폐물관리기술개발 중장기기획과제(2009T100200033)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] IAEA Safety Standards, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, No. TS-R-1, International Atomic Energy Agency, 2009.
- [2] 교육과학기술부고시 제2009-37호, 방사성물질등의 포장 및 수송에 관한 규정고시, 2009.
- [3] Daniel Powell, Gavin Davies and Chi-Fung Tso, "Natural Ventilation of a Generic Cask under a Transport Hood-CFD and Analytical Modelling", 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Paper #256, Berlin, Germany, 2004.
- [4] Sung-Hwan Chung, Chang-Yeal Baeg, Byung-Il Choi, Ke-Hyung Yang and Dae-Ki Lee, "On-Site Transport and Storage of Spent Nuclear Fuel at Kori NPP by KN-12 Transport Cask", Journal of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.4(1), pp.51-58, March 2006.
- [5] J. P. Holman, Heat Transfer, 10th ed., pp. 332-334, McGraw-Hill, NewYork(2010).
- [6] Frank P. Incropera and David P. Dewitt,

- Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., pp.839, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [7] ASHRAE Handbook, 2001 Fundamentals, 2001.
- [8] Karl Terpager Andersen, "Theory for Natural Ventilation by Thermal Buoyancy in One Zone with Uniform Temperature", Building and Environment, 38, pp.1281-1289, 2003.
- [9] Frank M. White, Fluid Mechanics, 3rd ed., pp. 412-416, McGraw-Hill, NewYork (1994).
- [10] Ju-Chan Lee, Kyung-Sik Bang, Ki-Seog Seo, Ho-Dong Kim, Byung-Il Choi and Heung-Young Lee, "Thermal Analysis of a Spent Fuel Storage Cask under Normal and Off-Normal Conditions", Journal of the Korean Radioactive Waste Society, Vol.2(1), pp.13-22, March 2004.