

## 사용후 핵연료 고밀건식저장 시설의 최적 열 설계

### Optimum Thermal Design for the High Density Dry Spent Fuel Storage System

고덕준, 김병태  
한전 원자력환경기술원  
대전시 유성구 덕진동 150

김상녕, 최용준  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천리1

#### 요 약

고밀건식저장 시설 설계시 사용후 핵연료의 건전성 유지를 위해 저장된 사용후 핵연료 및 핵연료 피복관 최대허용온도가 제한치를 넘지 않아야 하며, 이를 위해서는 저장시설 내부유로의 마찰 및 유동형상 변화에 따른 압력강하보다 내부유로의 온도 상승으로 인한 부력이 크도록 설계되어 충분한 냉각유량을 가져야 한다. 이에 따라 월성 원전 1호기의 사용후 핵연료를 원형으로 고밀저장 능력이 우수한 저장조(Vault) 형태로 시설을 설계하여 기하학적 형태(Geometry Type), 저장기수(Number of Casks), 피치(Pitch)를 주요 변수로 직접 개발한 전산코드와 HEATING7.2 전산모사 코드를 이용하여 Cask 내부 최대온도를 계산하였다. Cask를 3×3, 5×5, 7×7 배열로 모사한 결과 제한 온도인 180℃를 전반적으로 만족하였으며 고밀건식저장 시설에 대한 최적 열 설계 방안으로 분석되었다.

#### Abstract

The temperature of the stored spent fuel and its cladding must be kept below the temperature limitation to maintain the integrity of spent fuel in high density dry storage system. To do this, the system must be designed to supply enough cooling air. So the buoyancy force should be greater than flow resistance force which is caused by friction and form loss. Therefore, the Vault, which dense storage ability is superior, for store Wolsung#1 spent fuel was designed. To calculate maximum temperature in the cask, own developed code and HEATING7.2 were used which related variables were geometry type, number of cask and pitch. In the case of 3×3, 5×5, 7×7 arrays the results showed that the maximum temperature generally satisfy the limit temperature 180℃, and this method can be estimated the optimum heat transfer design for the high density dry storage system

## 1. 서론

최종 처분전까지 중간저장으로 각광받고 있는 건식저장은 국내에서 최초로 1990년대초 부터 월성 원전 1호기에 건설 운영하기 시작하여 점차 확대 적용되고 있다. 이러한 시점에서 사용후 핵연료의 영구 처분 시설을 아직 갖지 못한 국내의 상황에서 점차 늘어가는 사용후 핵연료에 대한 여러 가지 합당한 처리 방안이 제시되었고, 특히 고밀건식저장(High Density Dry Storage System)을 통한 저장능력 확대는 매우 긍정적으로 받아들여 그 타당성을 검토하고 있다. 고밀건식저장시설의 설계를 위해서는 사용후 핵연료의 건전성 유지를 위한 최적의 잔열제거 계통이 필요하며 이를 위한 최적 열설계는 필연적인 과제이다. 본 연구에서는 고밀건식저장 시설의 최적 열 설계를 위해 저장조(Vault) 형태의 건식저장 시설을 원형으로 월성 원전 1호기의 사용후 핵연료를 저장하기 위한 고밀건식저장 시설을 설계하여 예상되는 최대 핵연료 피복관 온도를 도출하여 최대 허용 온도 규제치인 180℃에 부합되도록 열 설계를 실시하였다. 고밀건식저장 시설의 최적 열 설계를 위해 본 연구에서 채택한 연구방법은 다음과 같다.

첫째, 현재 540개의 사용후 핵연료 다발(Bundle)을 저장할 수 있는 월성 원전 1호기 사용후 핵연료 건식저장 시설을 원형으로 금속 캐스크(Metal Cask)에 같은 수의 사용후 핵연료 다발을 저장하여 그 캐스크(Cask)를 정방 형태로 저장 가능한 철근 콘크리트 구조물을 설계한다.

둘째, 공기의 자연대류를 통한 잔열제거를 위해서 철근 콘크리트 구조물 전체의 열 제거 능력을 압력차( $\Delta P$ )를 이용한 지배방정식을 만들어 주요 변수인 구조물 입출구의 온도차( $\Delta T$ )와 캐스크(Cask)의 표면 온도( $T_w$ )를 Side Pitch, Center Pitch 그리고 사용후 핵연료의 열출력을 변화시키

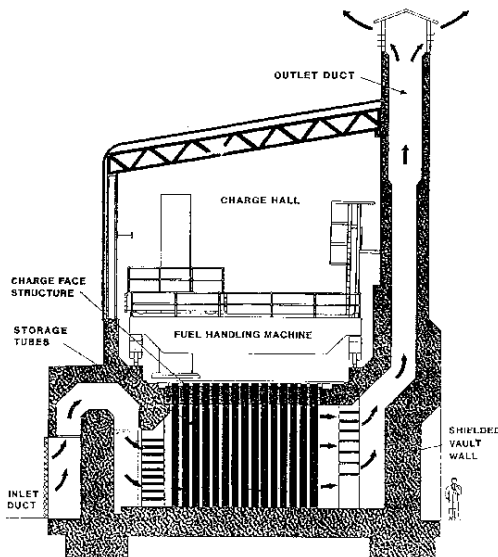


그림 [1-1] 저장조(Vault)

는 조건을 주어, FORTRAN90을 이용하여 수치해석적 방법인 반복해법을 통해 계산한다.

셋째, 각 조건에서 도출된 표면 온도 중 최대 온도를 선택한 후 신뢰도 향상을 위해 여유도를 20% 부여한 결과 값을 이용하여 전산 모사 코드인 HEATING7.2를 통해 사용후 핵연료 건식저장 시설의 내부 최대 온도를 예측한다.

이상의 방법을 이용하여 도출된 사용후 핵연료 고밀 건식저장 시설의 최대 사용후 핵연료 피복재 온도는 충분히 보수적이며, 최적 열 설계 방안으로 사용후 핵연료 고밀건식저장 시설의 건설에 훌륭히 부합될 것으로 예상된다.

## 2. 본론

### 2.1 건식저장 시설의 설계 요건

건식저장의 설계시 우선 시설의 건전성이 보장되어야 하며, 건식저장 시설의 건전성은 핵연료 및 피복관의 건전성 여부에 의존한다. 핵연료 및 피복관의 건전성과 관련하여 고려해야 할 두 가

지 중요항목은 충전기체의 선정과 최대 피복관 온도이다. 모든 종류의 건식저장시설에는 내부에 공기, 질소, 이산화탄소와 헬륨, 아르곤, 네온등의 불활성 기체를 충전한다. 이 같은 충전기체는 저장온도와 핵연료의 종류에 따라 다르며, 특히 열전달의 측면에서 매우 중요하여 최대피복관온도를 조절하는데 매우 큰 역할을 하고 있다. 공기에 비해 불활성 기체는 핵연료의 산화를 억제하는데 많은 도움이 되어 최대 핵연료 피복재 온도 제한치의 상승에 기여하나, 공기에 비해 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 특히 공기중의 저장은 만일 피복관에 결함이 있다면 지르칼로이와  $UO_2$ 의 산화를 야기할 수 있으며 특히  $UO_2$ 의  $U_3O_8$ 으로의 산화는 핵연료 팽창, 핵연료의 분말 형성으로 인한 핵분열 생성물의 방출 결과를 가져오고 피복관에 균열을 야기할 수 있다.

## 2.2 열전달 특성

### 2.2.1 저장용기 내부의 열전달

내부 열전달 현상 연구 과정에서 가장 큰 어려움은 건식저장 용기내의 열전달 현상이 전도, 대류, 복사 열전달이 복합적으로 모두 존재하며, 어느 하나의 현상도 지배적이지 않는다는 점이다. 특히 대류의 경우는 저장 조건과 형태(Geometry Type)에 따라 자연대류 여부를 결정하는 Nusselt 수가 달라지며 대류의 유무를 결정할 수 있게 된다. 사용후 핵연료 건식저장 시설 내부의 자연대류 여부를 연구한 Thomas와 De Vahl Davis는 사용후 핵연료의 형상비 H, 동심원비 K, Rayleigh 수에 의해 핵연료 사이의 자연대류를 가능하게 하는 Nusselt 수가 결정된다는 결과를 제시하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 HEATING5 코드로 월성 1호기 건식저장 시설의 열적 안전성을 평가한 연구에서는 월성 1호기 건식저장시설은 대류를 제외한 전도와 복사만으로 내부에서의 열전달이 발생한다고 결론 지었다.

### 2.2.2 저장용기 외부의 열전달

사용후 핵연료로부터 저장용기로의 1차 열방출은 복사, 대류 및 전도에 의해 이루어지나 저장용기 외부로부터 환경으로의 2차 열방출 과정은 자체 조정기능을 갖는 열유동현상(Self-Regulation Natural Thermo-Syphon)과 저장조 외부 환경과의 온도차로 인한 부력유동에 의한 냉각으로 이루어진다. 즉 저장조(Vault) 전체 저장 공간에 대해 열적평균화를 이루는 열전달 현상이 발생하게 되고 건식저장 캐니스터(Canister)나 캐스크(Cask), 사일로(Silo)등의 표면과 외부공기와의 온도차에 의한 자연대류는 저장조(Vault)의 경우 내부 저장 공간의 공기온도 상승을 유발하며 이는 곧 저장조(Vault) 전체에서 환경으로의 열방출을 가능하게 하는 부력효과를 생성하게된다. 이는 건식저장법의 가장 큰 장점인 피동형 냉각 개념에 의해 열방출이 이루어지며, 이러한 열전달 현상에도 건전성 유지를 위한 최대 허용 핵연료 피복관 온도를 만족해야 한다.

## 2.3 최적 열 설계 방안

### 2.3.1 가정

① 그림[2-1]과 같이 내부에 사용후 핵연료 저장용기(Cask)를 저장하는 철근콘크리트 구조물 형태

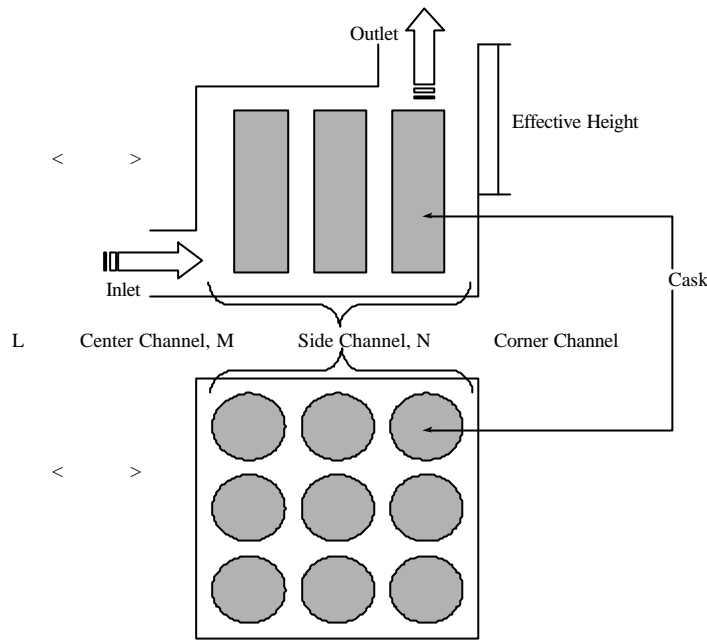


그림 [2-1] 고밀건식저장 시설의 기본 형태(3×3배열)

동일하다.

⑤ 실제의 공기 흐름은 수직류 및 횡류가 복합적으로 존재할 것이다. 그러나 계산의 편의와 보수적인 결과를 위해 수직류만 존재한다고 가정한다.

⑥ 입구 및 출구의 크기는 너비 1m로 고정하고, 그 폭은 철근 콘크리트 구조물의 길이와 같게 한다.

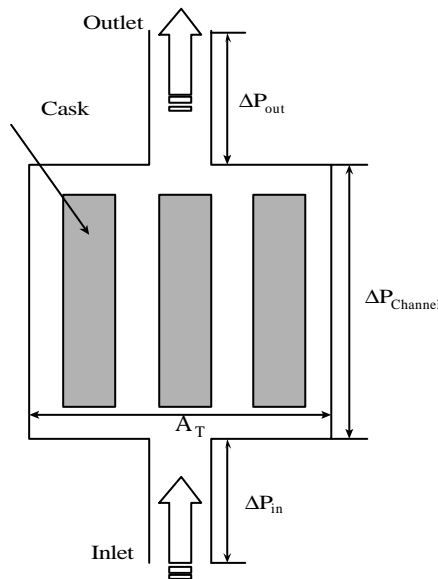


그림 [2-2] 압력차( $\Delta P$ ) 계산을 위한 개략도

를 설계한다.

② 입구에서 유입되는 공기의 온도는 40℃로 설정하고, 사용후 핵연료의 잔열제거는 공기를 통한 자연대류로만 이루어진다. 즉 철근 콘크리트 구조물을 통한 열전달은 없다.

③ 그림[2-2]와 같이 등가유로의 구조물 형태로 변화하여 입구, 출구, 내부유로의 세 부분으로 나누어 압력차( $\Delta P$ )를 계산하며, 내부유로는 중심(Center), 변(Side), 구석(Corner)로 나눈다.

④ 내부유로의 중심(Center), 변(Side), 구석(Corner)의 압력강하는

### 2.3.2 주요 지배방정식

저장 시설내부의 자연대류에 의한 입,출구의 온도차( $\Delta T$ )가 굴뚝효과(Chimney Effect)를 생성한다. 이로 인한 저장 시설의 공기 환기량은 사용후 핵연료 피복관의 최대 허용 온도를 넘지 않도록 충분한 유량을 가져야 한다. 따라서 사용후 핵연료 고밀건식저장 시설은 굴뚝효과에 의해 생성되는 압력차( $\Delta P_F$ )가 내부 유로 및 입출구의 마찰, 형상, 유동방향에 기인한 압력차( $\Delta P_T$ )보다 커지도록( $\Delta P_F \geq \Delta P_T$ ) 설계되어야 한다.

전체 계통의 등가 유로에 대한 압력강하 방정식은

$$\Delta P_{Friction} + \Delta P_{Form} = \bar{\rho} g A T H \dots \dots \dots [2-1]$$

가 되며, 각 유로별 질량유량의 합은 질량보존의 법칙에 의해 총 유량과 같으므로

$$\dot{m}_T = L \dot{m}_C + M \dot{m}_S + N \dot{m}_O \dots\dots\dots [2-2]$$

Energy Balance에 의한 식 [2-3]을 만족한다.

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_T C_P \Delta T \dots\dots\dots [2-3]$$

① 마찰에 의한 압력강하(  $\Delta P_{Friction}$  )

전체 시설의 마찰에 의한 압력강하는 입구, 출구, 내부유로 압력강하의 합이다. 또한 내부유로의 경우 가정④에 의해 중심, 벽면, 구석 유로의 압력강하는 모두 동일하다. 따라서 이를 상기에 언급한 주요 지배방정식에서 대입, 소거하면  $\Delta P_{Friction}$ 을 구할 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} \Delta P_{Friction} &= \Delta P_{in} + \Delta P_{Channel} + \Delta P_{out} \\ &= \left( \frac{\dot{Q}_T}{C_P \Delta T} \right)^2 \left[ \frac{C_{D_n}}{2\rho_{in} A_{in}^2} + \frac{C_{D_c}}{2\rho F_D^2} + \frac{C_{D_{of}}}{2\rho_{out} A_{out}^2} \right] \dots\dots\dots [2-4] \end{aligned}$$

ii) 형상, 유동방향에 의한 압력강하(  $\Delta P_{Form}$  )

전체 구조물에 대한 압력강하(  $\Delta P_{Form}$  )는 입구에서 유입된 공기가 핵연료 저장용기(Cask)사이를 통과하면서 발생한다. 따라서

$$\Delta P_{Form} = \frac{K}{2\rho_{in} A_T^2} \cdot \left( \frac{\dot{Q}_T}{C_P \Delta T} \right)^2 \dots\dots\dots [2-5]$$

iii) 구조물 전체의 압력강하

$\Delta P_{Friction} + \Delta P_{Form} = \frac{\rho g \Delta T H}{T_{in} + \frac{1}{2} \Delta T}$  에 식 [2-5], 식 [2-6]을 대입하면

$$\begin{aligned} \therefore \left( \frac{\dot{Q}_T}{C_P \Delta T} \right)^2 &\left[ \frac{C_{D_n}}{2\rho_{in} A_{in}^2} + \frac{C_{D_c}}{2(\rho_{in} + \rho_{out}) F_D^2} + \frac{C_{D_{of}}}{2\rho_{out} A_{out}^2} + \frac{K}{2\rho_{in} A_T^2} \right] \\ &= \frac{(\rho_{in} + \rho_{out}) g \Delta T H}{2T_{in} + \Delta T} \dots\dots\dots [2-6] \end{aligned}$$

이 된다. 식 [2-7]으로부터  $\Delta T$ 를 구하여  $T_{out}$ 을 구할 수 있다.

그리고, 사용후 핵연료 저장용기(Cask) 표면으로부터의 발열량  $\dot{Q}_{Cask}$ 는 대류와 복사를 통해 제거되므로

$$\dot{Q}_{Cask} = h_c A_{Cask} (T_w - T_a) + h_r A_{Cask} (T_w^4 - T_a^4) \dots\dots\dots [2-7]$$

으로 표현할 수 있으며, 이때의 대류 열전달 계수( $h_c$ )는  $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3}$ 를 이용한다. 이를 통해 저장용기(Cask) 표면온도  $T_w$ 을 구할 수 있다.

2.3.3 마찰 및 형상, 유동변화 계수

① 마찰 계수

마찰계수의 주요 변수는 유체의 속도와 마찰면의 상대거칠기 등이 있다. 그러나 본 연구에서는 유체의 속도만의 함수로 이루어진 경험식을 이용하여 마찰계수를 유도하였다. 마찰면이 충분히 부드럽다(Smooth)고 할 때 그 내용은 표 [2-1]과 같다.

$Re < 2000$	$f = 64/Re$
$2 \times 10^3 \leq Re < 2 \times 10^4$	$f = 0.316Re^{-0.25}$
$2 \times 10^4 \leq Re < 3 \times 10^5$	$f = 0.184Re^{-0.2}$
$3 \times 10^5 \leq Re < 3.4 \times 10^6$	$f = (1.82 \cdot \text{Log}Re - 1.64)^{-2}$
$Re \geq 3.4 \times 10^6$	$f = 0.018$ (최대값)

표 [2-1] Re수에 따른 마찰계수(f)의 경험식

㉓ 형상 및 유동 변화계수

내부유로의 경우 마찰에 의한 압력강하 보다 형상 및 유동변화에 따른 압력강하가 더 클 것으로 예상되며 다중유로(Multipath, Manifold)의 압력강하 상관식을 이용하여 그 계수를 결정하였다. 이때  $K = K' \sin \theta$  이고  $K'$ 는 다음과 같다.

i)  $Re \geq 10^5$  일 때

$$K' = \left[ (0.5 + r\sqrt{1-\bar{A}}) \times (1-\bar{A}) + (1-\bar{A})^2 + f \frac{L}{D_e} \right] \frac{1}{A^2} \dots\dots\dots [2-8]$$

ii)  $Re < 10^5$  일 때

$$K' = \left( K_P + \frac{\bar{\epsilon}_o^{Re}}{\epsilon_o} K_0 + f \frac{L}{D_e} \right) \frac{1}{A^2} \dots\dots\dots [2-9]$$

2.4 HEATING7.2를 이용한 최대 내부 온도 계산

2.4.1 코드 개요

HEATING7.2는 인허가용 전산 모사코드로서 1, 2, 3차원의 직교, 원통, 구좌표계에 대한 정상 및 과도상태의 열전도 문제를 해석할 수 있는 코드이며, 건식저장 용기내의 열전달을 적절히 모사할 수 있다. HEATING7.2 코드의 대표적 특성은 아래와 같다.

- FORTRAN77을 통한 컴파일(Compile).
- 열적 물성치인 열전도도, 밀도, 열용량 등을 위치, 시간, 온도의 함수로 입력 가능
- 열발생율을 시간, 위치의 함수로 입력 가능
- 경계조건을 대기(Environment), 일정 온도, 일정 열유속, 강제대류, 자연대류, 복사의 조합으로 적용가능하며, 각각 시간 및 온도의 함수로 입력 가능
- 재료의 상변화 적용 가능

2.4.2 가정

열성 원전 1호기 건식저장 시설의 열원(Heat Source)라고 할 수 있는 사용후 핵연료 다발(Bundle)은 매우 복잡한 형상을 띄고 있다. 또한 외부 대기 조건, 재질의 특성, 핵연료별 연소도,

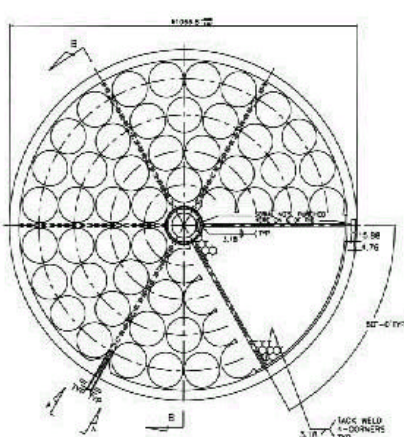


그림 [2-3] 바스켓(Basket) 내부 사용후핵연료 다발

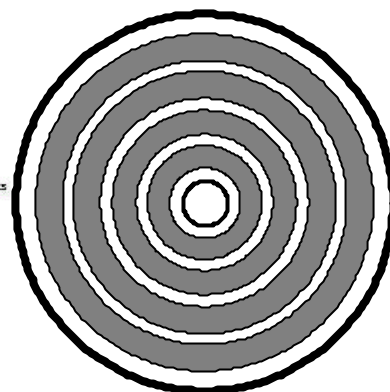
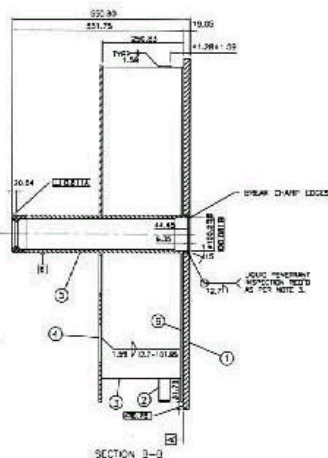


그림 [2-4] 등가동심원통형핵연료

습식저장 기간의 차이 등 다양한 변수를 갖고 있다. 따라서 코드 모사의 용이성을 위해 타당한 가정을 수립하였고, 그 내용은 아래와 같다.

- ① 핵연료간의 열전달 현상은 전도와 복사만 존재한다.
- ② 4줄 동심원 방향으로 저장된 바스켓내의 핵연료 다발을 등가 동심원통형으로 변경한다. 이는 내부의 열전달 현상 중 대류를 무시하므로 가능하며, 내부 최고 온도에 대해 더욱 보수적인 값을 나타낼 것으로 예상된다. 그림 [2-6]을 바탕으로 그림[4-3]과 같이 변환한 등가 원통형 핵연료 (Equivalent Diameter Cylindrical Fuel) 모델은 핵연료의 동심 위치가 일정한 상태에서 식 [2-11]를 이용하여 그 등가 동심원의 지름을 구할 수 있다.

$$\pi(R_o^2 - R_i^2) = N_b \frac{\pi}{4} D_b^2 \dots\dots\dots [2-11]$$

이때  $R_o$ ,  $R_i$ 는 동심원통 핵연료의 외, 내부 반지름,  $N_b$ 는 동심화한 핵연료 다발,  $D_b$ 는 다발의 지름이다. 위 식을 바탕으로 등가 동심 원통형 핵연료의 반지름은 표[2-2]와 같다.

중심으로부터의 거리(m)			축방향 위치(m)
$R_0 = 0.0$	$R_5 = 0.1912$	$R_{10} = 0.4797$	$Z_0 = 0.0$
$R_1 = 0.05$	$R_6 = 0.2604$	$R_{11} = 0.503$	$Z_1 = 0.327$
$R_2 = 0.06$	$R_7 = 0.2994$	$R_{12} = 0.5334$	$Z_2 = 0.365$
$R_3 = 0.0907$	$R_8 = 0.3696$	$R_{13} = 0.5555$	$Z_3 = 5.302$
$R_4 = 0.1545$	$R_9 = 0.4093$	$R_{14} = 0.565$	$Z_4 = 5.505$

표 [2-2] 등가동심원통형 모델을 이용한 중심방향, 축방향 거리

④ 건식저장 시설에 저장되는 사용후 핵연료의 연소도, 습식저장기간 등 많은 변수를 갖고 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 사용후 핵연료는 연소도 7800MWD/MTU로 운전한후 6년간 소내 습식저장을 거친 핵연료로서 다발당 6W의 붕괴열을 발생한다고 가정한다.

## 2.4 영역 분할(Nodalization)

그림[2-5]는 수직 원통형의 건식저장 캐니스터를 모사하기 위해 HEATING7.2에서 3차원 원통형으로 설정한 후 상기 제시된 가정에 따라 등가원통형 핵연료로 변형후 R-Z 좌표로 영역 분할(Nodalization)한 그림이다. 즉 그림[2-4]의 월성의 건식저장 캐니스터에서 철근콘크리트 구조물을 제거한 상태이다.

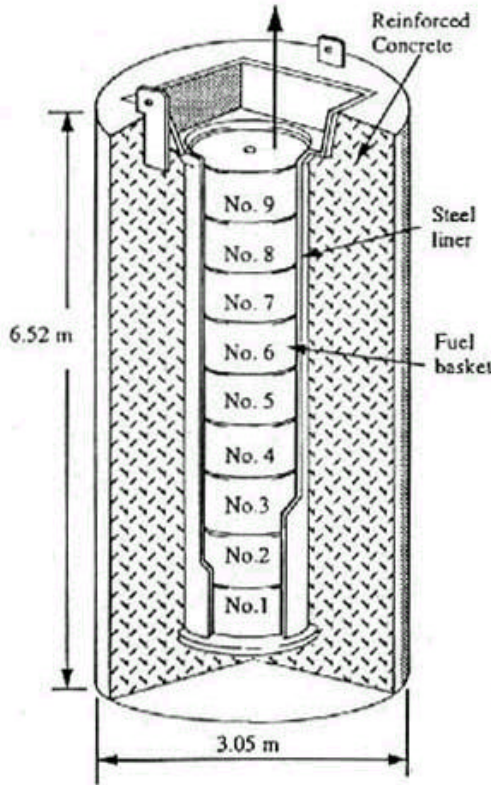


그림 [2-5] 월성 1호기 Canister

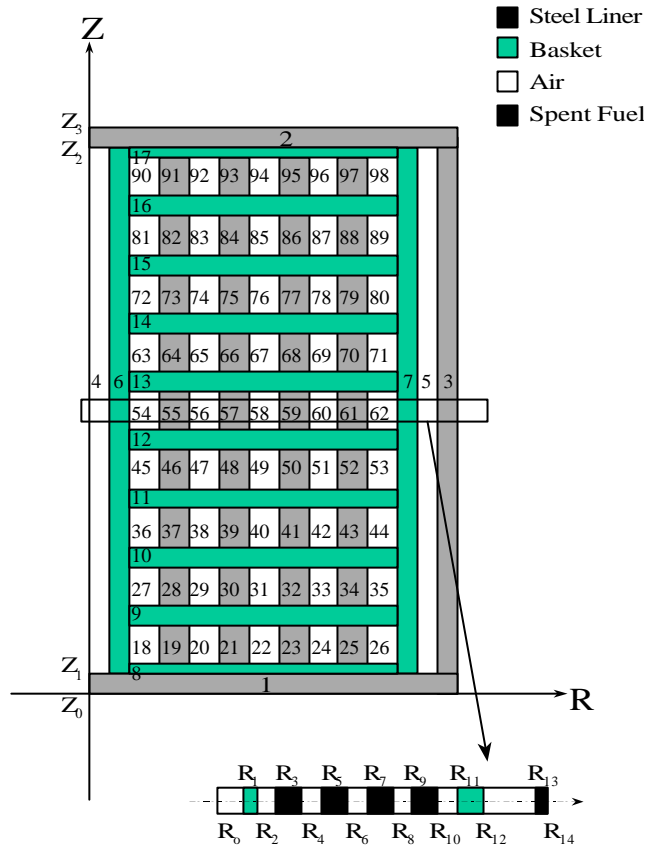


그림 [2-6] 고밀건식저장 시설의 영역분할

## 2.5 입력문

### 2.5.1 열적 물성치

열전달 해석의 가장 중요한 부분으로 열전도도, 밀도, 열용량을 입력한다. 핵연료의 경우  $UO_2$ 와  $Zr-2$ 의 합성물이므로 그 부피와 질량 평균을 이용하여 그 물성치를 구한다. 즉 평균밀도( $\bar{\rho}$ ), 평균 열전도도( $\bar{k}$ )는 부피평균으로, 평균열용량( $\bar{C}_P$ )은 질량 평균을 통해 구한다.

$$\bar{\rho} = \sum_i \rho_i \phi_i, \quad \bar{k} = \sum_i k_i \phi_i, \quad \bar{C}_P = \sum_i C_{P,i} \gamma_i \dots\dots\dots [2-12]$$

이때  $\phi_i$ 와  $\gamma_i$ 는 물질 i의 부피비와 질량비로서, 23.6kg의 CANDU 핵연료 다발에서의  $\phi_{UO_2}=84.9\%$ ,  $\phi_{Zr-2}=15.1\%$ ,  $\gamma_{UO_2}=90.39\%$ ,  $\gamma_{Zr-2}=9.61\%$  이다. 식 [2-12]를 이용한 물성치는 표 [2-3]와 같다.



T(°C)	k		$\bar{k}$	$\rho$		$\bar{\rho}$	C <sub>P</sub>		$\bar{C}_P$
	UO <sub>2</sub>	Zr-2		UO <sub>2</sub>	Zr-2		UO <sub>2</sub>	Zr-2	
37.8	8.70	11.82	9.17	10958	6504	10284	238.9	292.9	243.9
93.3	7.73	11.94	8.37	-	-	-	256.5	304.6	261.1
204.4	6.31	12.32	7.21	-	-	-	281.2	319.7	284.9
315.6	5.34	12.77	6.47	-	-	-	295.4	330.1	298.7

표 [2-3] UO<sub>2</sub>와 Zr-2의 부피, 질량 평균한 열적 물성치

또한 복사 열전달 계수 계산을 위한 방사율(Emissivity)은 표 [2-4]와 같다.

구 분	방사율
Zr-2 피복재	0.65 (가능범위 : 0.6 ~ 0.7)
스테인레스 스틸	0.33
탄소강	0.41

표 [2-4] 각 물질별 방사율(Emissivity)

### 2.5.2 경계조건

HEATING7.2에서는 대류와 복사를 조합하여 유효열전달계수( $h_{eff}$ )를 설정한다. 각 조건별로 강제 대류( $h_c$ ), 복사열전달계수( $h_r$ ), 자연대류계수( $h_n$ ), 자연대류형상계수( $h_e$ )를 입력해야 되나,  $h_c$ 와  $h_n$ 은 0으로 입력한다.

$$h_{eff} = h_c + h_r [T_i^2 + T_j^2] [T_i + T_j] + h_n [T_i - T_j]^{h_e} \dots\dots\dots [2-13]$$

HEATING7.2의 복사 열전달은 회체(Gray Body)를 적용하여 계산한다.

$$h_r = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_i} + \left(\frac{A_i}{A_o}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_o} - 1\right)} \dots\dots\dots [2-14]$$

이때  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_o$ 는  $A_i$ ,  $A_o$ 는 각각 열전달이 이루어지는 두 면적의 방사율과 면적이며,  $\sigma$ 는 볼츠만(Boltzmann) 상수로  $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^2$ 이다.

본 연구에서는 모두 4가지의 경계조건을 선정하였다. 다음은 각 경계조건별 입력 내용이다.

- 조건 1 : 저장기(Cask)의 표면온도  $T_w$ (Specified Temperature)
- 조건 2 : 핵연료 다발 사이 간극(Gap)과 바스켓과의 열전달(전도, 복사)
- 조건 3 : 핵연료 다발 사이의 열전달(전도, 복사)
- 조건 4 : 바스켓과 탄소강 밀봉재 사이의 열전달(전도, 복사)

### 2.5.3 열원(Heat Source)

한 개의 다발에서 붕괴열이 6W가 발생한다고 할 때, 1기의 캐니스터에서 발생하는 사용후 핵연료 다발의 체적열발생율(Volumetric Heat Generation Rate)은 약  $1480 \text{W/m}^3$ 이다. 그러나 HEATING7.2에서는 입력은 체적열발생율을 사용하나 코드 계산시는 전체열발생량(Total Heat ;

단위 Watt)를 사용한다. 따라서 등가동심원통형으로 변환시 유효숫자에 의한 실제와의 부피 차이가 발생하므로 입력 체적열발생율을 보정할 필요가 있다.

구분	1열	2열	3열	4열
W/m <sup>3</sup>	1476,802	1478,561	1475,813	1476,575

표[2-6] 각 열(Row)별 체적열발생율

## 2.6 코드 수행 결과

상기의 가정, 경계조건 및 각종 수치를 대입하여 건식저장 캐니스터의 정상상태 온도분포를 계산하였다. 정상상태 계산은 직접해법(Direct Solution Method)를 이용하였으며, 최대 계산(Iteration) 수는 50회, 수렴조건은  $10^{-6}$ 으로 지정하였다. 또한 전체 영역을 가로 14개, 세로 18개의 세분 영역(Mesh)로 나누었다. 월성 원전 1호기 사용후 핵연료의 붕괴열과 같은 6W/다발의 열출력을 발생할 때 3×3 배열의 경우 그림[5-5]와 같이 Side Pitch=0.6m, Center Pitch=1.05m에서 171,606℃로 최저 사용후 핵연료 피복관 온도를 보이고 있으며, 수행한 모든 범위의 간격(Pitch)에 대해 최대 허용 핵연료 피복관 온도를 초과하지 않았다. 5×5 배열의 경우는 그림[5-6]과 같이 Side Pitch=0.8m, Center Pitch=1.2m에서 176,044℃로 최저 사용후 핵연료 피복관 온도를 보이고 있으며, 7×7 배열의 경우는 그림[5-7]과 같이 Side Pitch=0.8m, Center Pitch=1.2m에서 178,676℃로 최저 사용후 핵연료 피복관 온도를 보이고 있다.

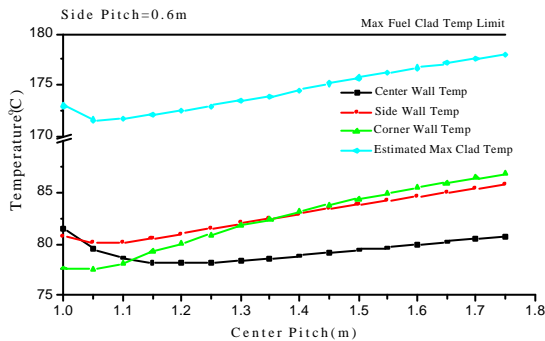


그림 [2-7] 6W/Bundle, 3×3 배열의 온도분포

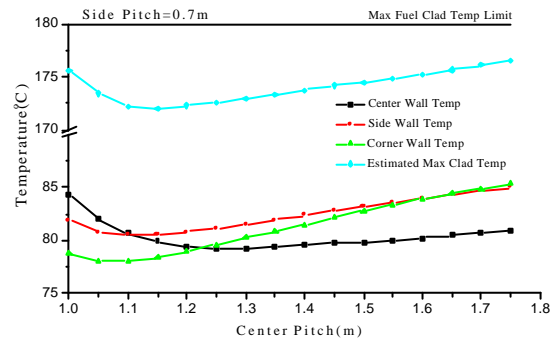


그림 [2-7] 계속(Continue)

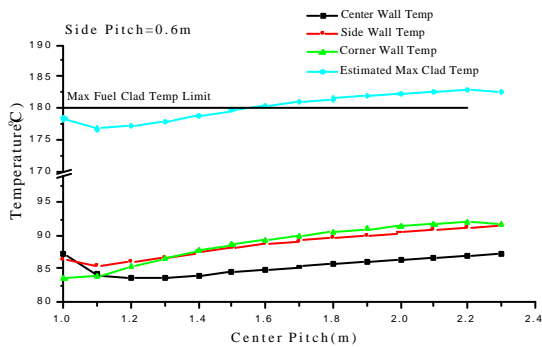


그림 [2-8] 6W/Bundle, 5×5 배열의 온도분포

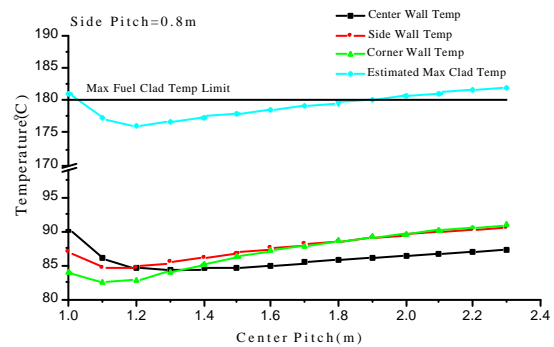


그림 [2-8] 계속(Continue)

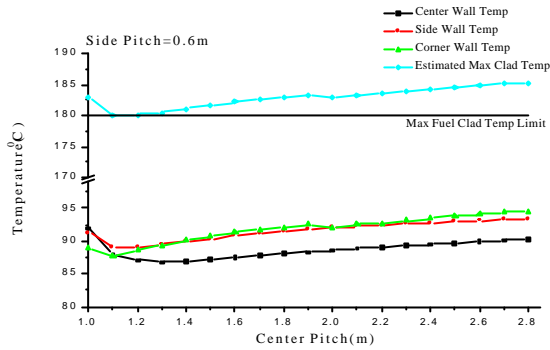


그림 [2-9] 6W/Bundle, 7×7 배열의 온도분포

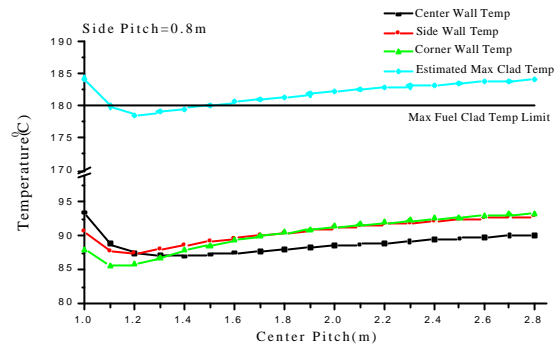


그림 [2-9] 계속(Continue)

### 3. 결론

최적 열 해석을 실시하는 과정에서 고밀건식저장 시설 설계시 매우 다양한 변수가 존재한다. 특히 붕괴열과 구조적 형태(Geometry)는 환경으로의 열 방출 여부에 직접적인 변수로 작용하며, 이러한 열 해석의 결과는 축소모델을 이용한 실험에 의해 보완되어야 한다. 즉 시설물의 기하학적 형상, 저장용기의 거치 방향, 열 전달 특성의 불확실성 등 매우 복잡한 변수가 존재한다. 따라서 수학적인 모델링 만으로는 부족하다.

본 연구를 진행함에 있어서 얻은 몇 가지 결론은 다음과 같다.

첫째, 국내에 적합한 사용후 핵연료 고밀건식저장 시설은 저장조(Vault)를 소형화(Modular)한 형태가 필요에 따른 증설 및 유지 보수에 가장 유리할 것으로 판단된다.

둘째, HEATING7.2 전산 모사 코드는 건식저장 시설의 내부 온도분포를 모사하는데 매우 적합하다.

셋째, 저장조(Vault) 형태의 고밀건식저장 시설을 설계하여 Center Pitch, Side Pitch를 변수로 하여 반복해법에 관한 지배방정식을 유도하고, 이를 FORTRAN90을 이용하여 수치해석을 실시하여 사용후 핵연료 저장용기(Cask)의 표면온도  $T_w$ 를 계산할 수 있으며, 이 값에 20%의 여유도를 부여하여 HEATING7.2에 적용시키면 최대 사용후 핵연료 피복관 온도를 도출할 수 있다.

넷째, 사용후 핵연료 저장기(Cask)를 3×3 배열, 5×5 배열, 7×7 배열의 경우에 대해 전반적으로 최대 허용 핵연료 피복관 온도인 180℃를 만족하며, 고밀건식저장 시설을 설계, 건설하는데 이 방법을 적용할 수 있으며 충분히 보수적이다.

### 4. 참고문헌

[1] D.W.Patterson, M.L.Swanson, "Wolsong 1 Nuclear Generating Station : Spent Fuel Dry Storage : Thermal Analysis of the spent Fuel Storage Basket", Technical Document, 1990

[2] 서중석, 박주완, 사용후핵연료 저장시설의 열해석 기법, 기술현황분석 보고서, 한국원자력연구소부설 원자력환경관리센터, 1994

[3] 박종운, 전문현, 월성1호기 사용후 핵연료 건식저장 캐니스터의 열적 안전성에 미치는 대기조건인자의 영향, 원자력학회지, Vol25, pp166~177, 1993

[4] IAEA, Survey of Experience with Dry Storage of Spent Nuclear Fuel and Update of Wet Storage Experience, Technical Reports Series No'290, 1988

[5] IAEA, Concepts for the Conditioning of Spent Nuclear Fuel for Final Waste Disposal Technical Reports Series No'345, 1992

[6] K.W.Childs "HEATING7.2 User's Manual" ORNL/TM-12262, (1992)

[7] S.M.Cho, A.H.Seitzer, M.Blackbourn, "Thermal-Hydraulic Analysis of the Fort St. Vrain Modular Vault dry Store System", ASME Journal of Engineering for gas Turbines and Power, Vol 113, pp522-529, 1991