

밀봉된 핵연료의 부수로 모델링 및 피복재 최대온도 예비계산

차정훈, 김상녕*, 최 경우**, 지준석*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 서천 1동

**한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 34

chaih@kaeri.re.kr

1. 서론

건식저장방식은 사용후핵연료 및 고준위폐기물을 공기나 불활성기체로 충전된 저장용기 내에 저장하는 방식으로, 습식저장방식에 비하여 저장용량 확장, 운영의 용이성, 안전성 및 경제적 측면에서 뛰어나며, 이미 미국을 비롯한 13개국에서 건설/운영 되고 있어 그 효용성이 입증된 기술이다. 그러나 이러한 건식저장 기술은 다른 분야의 선진기술과 마찬가지로 대부분 대외비로 취급되거나 특허에 의해 보호되어 있어 기본 메뉴얼 등을 제외한 기술개발 자료들의 습득이 어려운 실정이다. [1]

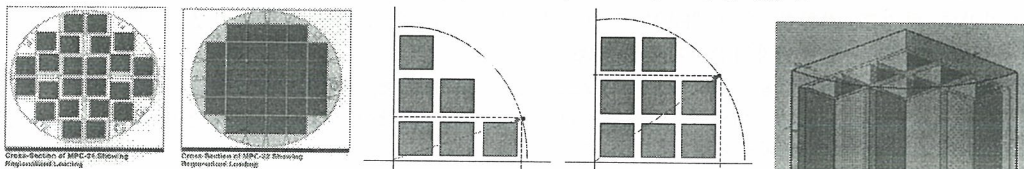
국내외에 건설된 건식저장시설은 여러 가지 방식이 있으나 대부분 저장용기와 그 외의 시설로 이루어져 있는 단순한 구조로 이루어져 있다. 또한 저장용기도 사용용도 및 핵연료 저장배열 등에 따라 여러 가지 종류의 용기들이 존재하지만 대부분 용기의 내부 구조는 핵연료를 지지하는 Basket과 기타 방사선 차폐를 위한 구조물로 이루어진 단순한 구조를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 상용화 되어 있는 한 가지 저장용기를 바탕으로 원자력연구원에서 제시한 기준 핵연료[2]를 저장한다고 가정하여, 핵연료 간의 간격을 계산하고 용기의 표면온도 변화에 따른 핵연료의 피복재 최대온도 및 내부 구성요소의 최대온도를 계산하였다.

2. 본론

본 연구에서 선택한 핵연료 저장용기는 미국의 Holtec Inc.에서 개발된 용기이다. 미국의 Holtec Inc.에서 개발된 수송-운반 겸용용기 중 24개와 32개의 경수로형(PWR) 핵연료를 저장할 수 있는 MPC-24와 MPC-32 모델을 기초로 하여 한국형 기준 PWR 핵연료를 저장하는 것을 가정 하였다. 다음 표는 기준 경수로형 핵연료와 Holtec Inc. 용기에 대한 제원이다[3].

Item(Unit)	Dimension	Attribute		
		MPC-24	MPC-32	
		a. Capacity (intact assemblies)	24PWR	32PWR
		b. Thermal(HI-STORM Storage)		
Assembly Array	16×16	Design Heat Rejection (kW)	27.7	28.74
Enrichment (wt. %)	4.5	Max. Burnup(GWD/MTU) (10year cooled)	61.2	49.6
Assembly Area (cm ²)	21.4×21.4	c. Dimensions (cm)		
Length(cm)	453	Overall Length	483	483
Burn-up(GWD/MTU)	55	Cavity Length	453	453
Decay Heat per bundle (W)	938.8	Cross Section	174	174
		Wall Thickness	1.27	1.27
		Lid Thickness	24.1	24.1
		Bottom thickness	6.4	6.4
Cooling Time	10 years	Basket Length	448	448

저장용기 내부의 핵연료 배열은 다음 그림과 같으며, 핵연료의 배열은 핵연료의 모서리가 용기 벽면에 최대한 근접했다고 가정하였으며, 그에 알맞은 핵연료간의 간격을 계산하였다. MPC-24와 MPC-32에 국내 기준 핵연료를 배열했을 때의 간격은 각각 2.7 cm와 1.99 cm로 계산되었다.



핵연료 다발은 매우 복잡한 형상을 가지고 있다. 용기 내부는 핵연료에서 발생하는 붕괴열에 의해 자연대류가 형성되고 핵연료 봉은 봉 사이의 helium gas 대류 열전달과 복사로 냉각된다. 이러한 열전달 메커니즘을 분석하기 위해서는 핵연료 부수로 간의 영향을 고려하여 계산을 수행해야 한다. 하지만 본 연구에서는 정상운전 조건에서 부수로에서의 Helium gas 대류 영향이 미미할 것으로 예상되어, 핵연료 다발 면적을 핵연료와 Helium gas로 Mixture라 가정하여 모델링하고 계산 하였다.

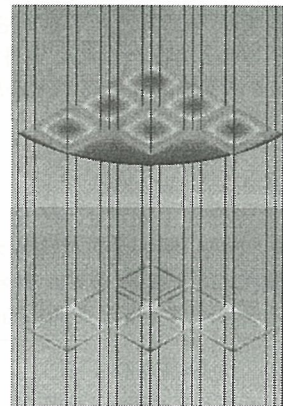
핵연료를 구성하고 있는 대표적인 물질인 UO_2 와 Zr는 $473^{\circ}K \sim 695^{\circ}K$ 온도 사이에서 열전도도의 변화가 미미하여 온도범위에서 가장 낮은 열전도도를 적용시켰다. Helium gas의 온도에 따른 열전도도와 점성, Basket을 구성하는 대표적인 물질인 Stainless steal의 열전도도는 아래와 같이 적용시켰다.

- Stainless Steel : $K_x = 8.617 + 0.017 \times T_x - 1.46^{-6} \times T_x^2$ [W/m · °K], T=절대온도[°K], at $470^{\circ}K \sim 700^{\circ}K$
- Helium Conductivity : $K_H = 0.042 + 3.76^{-4} \times T_H - 3.21^{-8} \times T_H^2$ [W/m · °K], T=절대온도[°K], at $400^{\circ}K \sim 800^{\circ}K$
- Helium Viscosity : $V_H = 7.6^{-6} + 4.47^{-8} \times T_H - 7.82^{-12} \times T_H^2$ [kg/m · s], T=절대온도[°K], at $600^{\circ}K \sim 800^{\circ}K$

계산은 용기표면온도가 $400^{\circ}K \sim 800^{\circ}K$ 까지 $100^{\circ}K$ 간격으로 Fixed 되어 있다는 조건으로 수행하였다. 계산 결과는 MPC-24, MPC-32의 정상 운영기간 중 용기내부 구조물의 최대온도와 비교 분석하였다. 또한 미국 ISG-11(Cladding Consideration for the Transportation and Storage of Spent Fuel, Interim Staff Guidance-11, Revision 3, 2003)을 참조하여 피복재의 온도가 정상운전 온도 한계 $400^{\circ}C$ 와 사고운전 온도 한계 $570^{\circ}C$ 에 다다를 때 용기 표면의 온도를 계산하였다. 다음은 계산결과를 표와 그림으로 나타낸 것이다.

구조물	MPC 24	계산 결과	계산 결과	추정	단위
피복재	366	350	283	314	[°C]
Basket	343	350	281	313	
Basket 주변	252	288	211	246	
벽면	173	227	127	173	
붕괴열	2.49	1.98		kW/m ³	

구조물	MPC 32	계산 결과	계산 결과	추정	단위
피복재	366	420	364	392	[°C]
Basket	349	420	363	392	
Basket 주변	258	305	235	270	
벽면	177	227	127	177	
붕괴열	2.57	2.63		kW/m ³	



단위[°C]	규제 온도 정상, 사고	피복재 온도	용기 표면 온도
MPC-24	400	400	293
	570	570	494
MPC-32	400	400	191
	570	570	440

3. 결론

계산결과와 상용화된 용기의 온도 비교 결과를 보면 약간의 피복관의 온도 차이를 볼 수 있는데 이는 본 연구에서 사용된 핵연료와 상용화된 용기가 대상으로 하고 있는 핵연료의 단위 부피당 붕괴열량의 차이로 나타나는 것으로 추측된다. 단위 붕괴열량을 보정하면 온도 차이가 미미 할 것으로 예상된다. 즉 피복재 온도가 $400^{\circ}C$ 에서 $570^{\circ}C$ 사이에서 형성되면, 붕괴열량 이외의 핵연료 부수로 간에 영향 등은 피복재 최대 온도 결정에 큰 기여를 하지 않는 것으로 예상된다. 하지만 전체적인 온도구배나 사고조건에서의 영향은 무시하지 못 할 것으로 생각된다. 또한 계산 결과에서는 균질화된 핵연료 다발의 최대온도를 피복재 온도로 가정하였기 때문에 어느 정도 피복재 온도의 보수성이 포함된 것으로 보인다. 향후 붕괴열량을 상용 용기와 맞춰 계산된 온도 분포 결과를 비교하고 핵연료 다발의 부수로 모델링이 용기 내부의 온도에 주는 영향을 분석하고자 한다.

참고문헌

- [1] 김상녕, 차정훈, 정현철, 유미, “HLW 장기건식저장에 따른 열적 안전성 해석기법 개발”, KINS/HR-852, 한국원자력안전기술원(2008).
- [2] 최종원 외, “고준위폐기물 처분기술개발”, KAERI/RR-2765/2006, 한국원자력연구원, 2006.
- [3] 김상녕, 차정훈, 윤범수, 이영중, 이현우, “HLW 장기건식저장에 따른 열적 안전성 해석기법 개발”, KINS/HR-905, 한국원자력안전기술원(2009).