

첨단 중성자 흡수소재를 적용한 Cask의 화재조건에서의 열적 건전성 평가

이희재, 김미진, 손동성*

울산과학기술원, 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

*dssohn@unist.ac.kr

1. 서론

건식저장방식은 용량확장과 장기관리 측면에서 유리하여 여러나라에서 설치하고 운영하고 있는 추세이다. 우리나라의 경우에도 건식저장시설의 필요성과 함께 건식저장용기의 개발이 요구된다. 그러나 Cask에 쓰이는 중성자흡수소재는 현재 전량 수입에 의존하고 있으며 독자적인 소재 개발이 필요하다. 고려되고 있는 첨단소재로는 금속기질인 스테인레스 강에 중성자흡수물질인 가돌리늄을 포함한 중성자 흡수소재이다. 가돌리늄은 스테인레스 강과 열물성치가 다른 경향을 가지고 있기 때문에, 첨단흡수소재를 적용한 Cask에 대해 설계요건 중의 하나로서 붕괴열을 충분히 제거가능하지가 고려되어야 하며 Cask의 열적분포에 얼마나 영향을 미치는지 평가해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 가돌리늄을 포함한 첨단흡수소재를 사용하는 Cask의 운반사고조건에서 열적건전성을 확인해보고자 한다.

2. 본론

2.1 설계모델

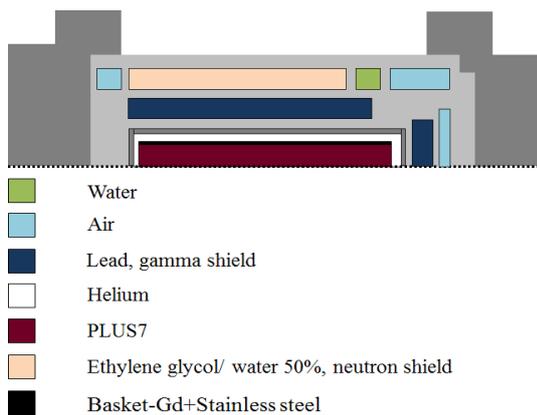


Fig. 1. 2D analysis model and description.

일반적으로, 건식저장방식은 저장중인 핵연료의 산화를 방지하기 위하여 물 대신 기체를 냉각재로 이용하고, 방사선 차폐체로 물 대신 콘크리트나 금속을 이용한다. 본 해석에서는 습식용기인 KSC-1

을 기본모델로 설계하였으나, 보수성을 위하여 내부 냉각재로 물이 아닌 불활성기체인 헬륨을 고려하였다. 또한 감마선 차폐체로는 납이, 중성자 차폐체로는 Ethylene-glycol 수용액이 사용되었다. 집합체를 내장하는 바스켓에는 기존 KSC-1에서는 스테인레스 강을 사용하나 설계모델에서는 가돌리늄을 첨가한 첨단흡수소재가 적용되었다.

2.2 Effective Thermal Propertis

모델에 적용된 물질들의 특성은 Fluent database file과 reference[2]을 참조하였다. 첨단흡수소재의 경우에는 가돌리늄 함량에 따라 열적특성이 달라지게 되므로 Bruggeman 모델에 적용하여 유효열전도도를 산정하였다. 가돌리늄 2vol% 함유하는 소재의 유효열전도도는 Fig. 2와 같다.

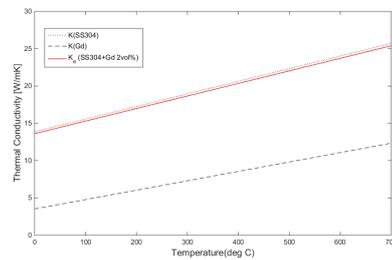


Fig. 2. Effective Thermal Conductivity of SS304 + 2vol% Gd.

가돌리늄의 열전도도는 스테인레스 강에 비해 낮으며 유효열전도도는 온도에 따라 증가하며 스테인레스 강과 유사한 경향을 보인다. 유효비열과 유효밀도는 가돌리늄의 부피 분율을 고려하여 계산되었다.

2.3 Thermal Analysis Model

기존모델은 B(U)형 운반용기로 규정에 따른 운반사고조건은 38°C의 주위온도조건 및 열적평형상태에서 800°C 화재가 30분 동안 진행된 후 자연냉각이 되는 조건이다. 따라서 고온조건에서 정상상태 해석 후 평형상태에 있는 시험물을 화재사고조건 시간의 변화에 따라 과도상태 해석을 수행하였다. 또한 화재가 시작하면서 용기 외부 shell의 Ethylene-glycol 수용액이 모두 누설되어 공기가 있는 것으로 가정하였다.

2.4 Boundary Condition

설계기준연료는 초기 U_{235} 농축도를 4.5wt%, 냉각기간 7년을 거친 PLUS7 집합체로 이에 대한 최대봉괴열은 체적에 대해 고려해주었다. 적용된 일광량은 '원자력안전위원회 고시 제 2014-50호'에 명시된 값을 적용하였다. 용기 내부에는 자연대류와 복사열전달을 동시에 고려함으로써 열 안전성 측면에서 보수성을 갖는다. 운반용기와 관련된 규정 Reference [4]에 따르면 화염의 유속은 5~10 m/s이며 대류열전달계수는 $15 W/m^2C$ 를 적용하였고, 규정된 표면방사율과 흡수율을 사용하였다.

2.5 결과

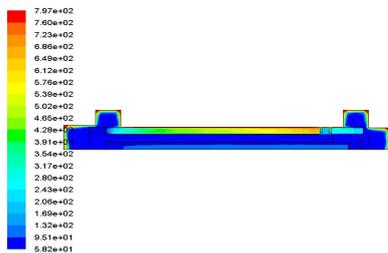


Fig. 3. Temperature distribution at 30min.

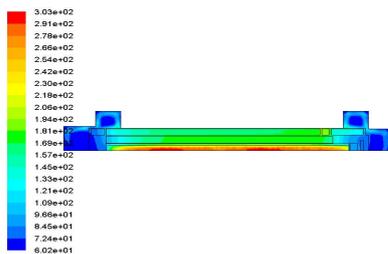


Fig. 4. Temperature distribution at 2hr.

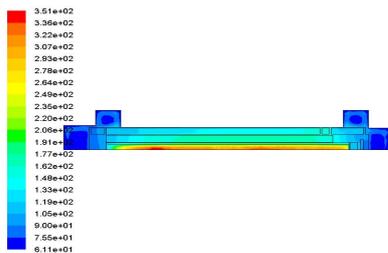


Fig. 5. Temperature distribution at 4hr.

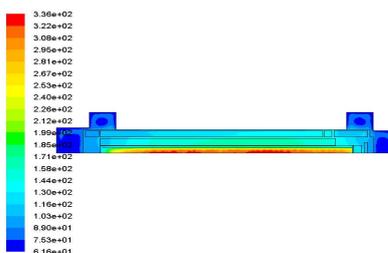


Fig. 6. Temperature distribution at 8hr.

초기조건으로는 최대의 봉괴열과 일광량이 적용되는 조건으로 이 때의 핵연료 표면의 최대온도는 150°C 이다. 30분간 화재가 일어난 후 자연냉각을 거치면서 복사열전달에 의해 급속도로 용기내부로 열전달이 진행되게 되며, 핵연료의 표면온도는 점차 증가한다. 자연냉각을 거친 cask 내부의 핵연료 표면의 최대온도는 336°C, 납 차폐체는 162°C 로 계산되었다.

3. 결론

본 연구에서는 핵연료집합체 한 다발을 수직으로 운반하는 운송용기에 대해서 사고조건하에 열해석을 진행하였다. 계산결과는 핵연료피복관 표면온도는 336°C로 핵연료파손을 방지하기 위한 570°C 허용한계 이하였다. 또한 납 차폐체 온도의 경우, 162°C로 용융점 327°C보다 낮아서 허용한계 이하이다. 이상의 결과로 보아 운반사고조건에서도 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.

4. 감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20141710201690)

5. 참고문헌

- [1] 방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템, web.
- [2] A.L. Edwards, "Trump/XB 2-A, Computer Program for Processing the Trump Thermal Property Data Compilation", UCRL-50663, May, 1967.
- [3] Mi-Jin Kim, Hee-Jae Lee, Dong-Seoung Sohn, "Absorber Contents and Wall thickness for Efficient Used Nuclear Fuel Storage", Proceedings of Global, Paris(France) Sep. 20-24, 2015.
- [4] IAEA, "Advisory material for the IAEA Regulations for the Safe Transport the Safe Transport of Radioactive Material", SAFETY GUIDE No. TS-G-1.1(ST-2).
- [5] KAERI, "KSC-1 수송용기 안전성분석보고서", Rev.2, Mar, 2015.