

## 핵연료저장조내 사용후핵연료 붕괴열 분포 해석

인준기

한국전력기술주식회사

E-mail: jgahn@kopec.co.kr

중심어 (keyword) : 사용후핵연료, 붕괴열, 감마에너지, 감마선 수송계산, 열에너지 침적

### 서론

원자로심에서 연소된 후 방출되는 사용후핵연료를 소내에서 습식 저장하는 사용후핵연료저장조 및 관련 시설은 적절한 냉각 능력을 가지도록 설계되어야 하며, 그렇지 못할 경우에는 환경으로의 방사성물질의 방출 혹은 작업자가 허용수준 이상의 방사성 피폭에 노출될 수도 있다 [1]. 이에 따라 사용후핵연료저장조와 저장된 사용후핵연료에 대한 열 해석을 수행하여 적절한 냉각 능력이 있음을 입증한다. 열 해석시 사용후핵연료 붕괴열은 모두 핵연료봉에서 방출된다고 가정하는 것이 일반적이지만 실제로는 핵연료봉에서 방출되는 감마선이 인접 물질과 반응하여 사용후핵연료 붕괴열의 일부는 주변 구조물에서 발생된다. 본 논문은 핵연료저장조내에 저장된 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열의 공간적 분포를 해석하는 것이다. 사용후핵연료의 노심 연소 후 냉각기간에 따른 붕괴열과 전체 붕괴열 중 감마에너지의 비율을 계산하였으며, 핵연료봉에서 방출되는 감마선의 수송계산을 수행하여 감마에너지의 공간적 침적 분포를 계산하고, 이로부터 사용후핵연료 전체 붕괴열의 공간적 분포를 평가하였다.

### 재료 및 방법

사용후핵연료 붕괴열 생성 및 저장조내 붕괴열 분포 계산의 대상으로는 APR1400 원전 (신고리 3,4호기) 노심에서 연소된 후 방출되는 PLUS7 사용후핵연료와 이를 저장하는 사용후핵연료 저장대 영역 I을

설정하였다. 사용후핵연료 전체 붕괴열 및 감마에너지는 SCALE4.4 전산코드[2]의 SAS2H/ORIGEN-S 모듈을 이용하여 계산하였으며, 사용후핵연료 저장대 영역 I의 각 구조물에 침적되는 감마에너지 분포를 계산하기 위한 감마선 수송계산은 MCNP5 전산코드[3]로 수행하였다.

사용후핵연료 전체 붕괴열과 감마에너지 계산을 위한 주요 입력은 노심 출력준위, 연소 주기, 냉각재 붕소 농도 등 노심 운전 자료와 핵연료에 대한 구성 물질, 기하학적 형상 등과 연소 후 냉각기간이다. 신고리 3,4호기 노심 및 PLUS7 핵연료 설계 자료를 기준으로 노심출력 준위 16.858 MWt/FA, 연소 주기 3주기, 노심 주기 길이 480 EFPD, 방출연소도 56,350 MWD/MTU를 가정하였다. 사용후핵연료 전체 붕괴열과 감마에너지는 연소 후 냉각기간에 따라 감소하지만 연소 후 냉각기간 경과에 따른 감마에너지의 감소 정도는 전체 붕괴열 감소보다 커서 노심 연소 후 핵연료저장조로 방출되는 시기인 수일 정도의 냉각기간에서는 전체 붕괴열 중 감마에너지가 차지하는 비율이 1/2 이상(약 55% 정도)이지만 냉각기간이 1년 정도 지나면 약 1/3 정도로 감소하게 된다.

사용후핵연료 붕괴열 중 감마에너지를 제외한 베타, 알파 등의 에너지는 해당 입자가 물질과 반응하는 궤적 거리가 매우 짧아 그 에너지 모두를 핵연료봉내에 침적시키는 것으로 고려할 수 있다. 핵연료봉에서 생성되어 방출되는 감마선은 핵연료봉 외부의 주변 물질과 반응하여 그 에너지의 일부를 침적하게 되는데 감마에너지 침적량은 MCNP5 전산코드를 이용한 감마선 수송해석으로 계산하였다. MCNP5 모델 구성시 PLUS7 핵연료집합체는 각 핵연료봉의 펠렛, 피복

관, 냉각재 영역을 사실적으로 구분해 모델링 하였으며 집합체내의 안내관, 영역 I 저장대 셀 구조물과 중성자흡수재판(BORAL), 중성자흡수재 고정판도 모두 실제 형상으로 모델링 하였다 (그림 1 참고). 사용후 핵연료가 저장된 저장대 영역 I은 저장 셀이 평면적으로 무한히 배열되어 있으며, 핵연료 축 방향 길이를 무한 길이로 가정하여 감마선 누설이 없는 보수적 모델을 적용하였다. MCNP5 코드의 감마선 수송계산에 이용한 핵단면적 자료는 ENDF/B-VI 핵자료를 근거로 하는 연속 핵단면적 자료이다. 사용후핵연료 감마선원 스펙트럼과 전체 붕괴열에서의 감마에너지 비율은 원자로정지 후 핵연료가 노심에서 방출되기까지의 최소 경과시간을 고려해 3일의 냉각기간을 가지는 방사선원 자료를 적용하였다.

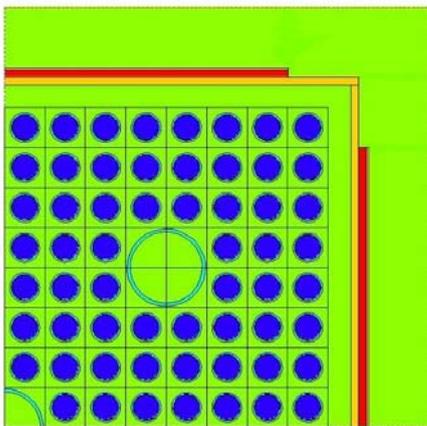


그림 1. MCNP 수송계산 모델 (1/4 저장대 셀)

## 결과 및 고찰

감마선 수송해석에 의한 열에너지 침적량 계산 결과인 핵연료봉에서 발생한 감마에너지가 각 물질 영역에 침적되는 비율과, 냉각기간 3일이 경과하였을 경우에 전체 붕괴열 (감마에너지 비율 55%)이 각 물질 영역에 침적되는 비율이 표 1에 제시되어 있다. 개별 핵연료봉 (펠렛 + 피복관)에 침적되는 붕괴에너지는 핵연료집합체내 핵연료봉 위치에 따라 다소 달라진다. 냉각기간 경과에 따라 전체 붕괴열 중 감마에너지가 차지하는 비율은 점차 감소되므로 냉각기간이 더 경과하면 전체 붕괴열의 절대 값은 감소하지만 핵연료봉에 침적되는 붕

괴열의 비율은 증가하게 된다.

표 1. 영역별 감마에너지 및 전체 붕괴열 침적 비율 (%)

region	gamma energy	total energy
pellet + clad	88.15	93.48
(pellet)	(82.22)	(90.22)
(clad)	(5.93)	(3.26)
moderator	4.88	2.69
water gap	0.90	0.49
steel wall	2.45	1.35
boral plate	0.56	0.31
sheath	0.49	0.27
water channel	2.57	1.41

## 결론

사용후핵연료가 핵연료저장대내에 습식 저장되어 있을 때 사용후핵연료의 붕괴열은 감마선의 물질과의 반응에 의해 일부 에너지는 냉각재 및 저장대 구조물에 침적되며 피복관을 포함한 핵연료봉에 침적되는 붕괴열은 전체 붕괴열의 95% 미만이다. 사용후핵연료에 대한 열해석시 정확한 붕괴열 분포가 필요한 경우에는 이같은 감마에너지 침적량 해석 결과를 붕괴열 분포로 적용할 수 있다.

## 참고 문헌

1. Regulatory Guide 1.13 (Revision 2), "Spent Fuel Storage Facility Design Basis," US NRC, 2007.
2. C00545/MNYCP00, "SCALE4.4 : Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstation and Personal Computers," Oak Ridge National Laboratory, 1998.
3. LA-UR-03-1987, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5," Los Alamos National Laboratory, 2003 (Revised 2005).