2002 추계원자력학술발표회 논문집
한국원자력학회

CANDU 사용후연료 건식저장모듈 균질화모델에 의한 방사선차폐해석

The Radiation Shielding Analysis for a CANDU Spent Fuel Dry Storage Module with Homogenized Model

윤정현, 최병일, 송양수, 이경호, 이홍영, 송명재, *조규성
원자력환경기술원, *한국과학기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 논문에서는 새로운 개념의 CANDU 사용후연료 조밀건식저장시설에 필요한 설계해석의 일환으로 사용후연료가 장전, 적재되는 건식저장모듈의 방사선 안전성을 평가하기 위하여 차폐계산을 수행하였다. 차폐계산은 1차원 전산코드인 SAS1 및 3차원 전산코드 QADS를 사용하였으며, 연소도 7,800MWD/ MTU, 냉각기간 6년인 CANDU 사용후연료를 기준연료로 하였다. 측면과 상부의 방사선차폐에 대한 평가기준을 각각 25μSv/hr 및 6μSv/hr로 설정한 결과 건식저장모듈이 측면에서 96cm, 상부에서 108cm 두께의 콘크리트 차폐체로 구성되면 방사선측면에서 안전한 것으로 나타났다.

Abstract

In this study, the radiation shielding analysis was carried out to conceptually verify radiological safety of a consolidated CANDU spent fuel dry storage module which is under development for Wolsong site. One-dimensional computer code SAS1 and three dimensional QADS were employed for the purpose of determination of minimum shielding thickness. The design basis fuel was assumed to have 7,800 MWD/MTU burnup in CANDU 6 type reactor with 6 years cooling in a spent fuel storage bay. From the calculation results, it can be driven that minimum concrete thicknesses for the module are 96 cm for side and 108cm for top, respectively. The determination of thickness is based on the maximum allowable dose rates 25μSv/hr on surface of module side and 6μSv/hr on top respectively.

1. 서론

현재 월성 원자력발전소의 각 호기 내에는 건설당시 만들어진 약 10년분의 사용후연료를 저장할 수 있는 습식저장조가 있다. 1983년에 상업운전을 시작한 월성 1호기의 경우 이미 1992년 말에 소내의 습식저장조가 포화상태에 도달하여 부지 내에 1기당 540다발의 저장용량을 가지는 Concrete Silo 방식의 건식저장시설 140기를 건설하여 운영 중에 있다[1]. 그림 1에는 현재 운영중에 있는 월성 건식저장시설을 나타내었다. 월성 원자력발전소 전체의 사용후연료 저장용량은 습식저장조와 건식저장시설이 있는 1호기가 114,916다발, 습식저장조만

있는 2, 3호기 및 4호기의 저장능력이 각각 51,072 다발로 총 268,132다발이며, 2030년 말까지 월성 원전 운영으로 발생하는 사용후연료는 총 663,660다발로 추정된다[2,3].

현재까지의 우리 나라 사용후연료 관리정책은 원전에서 발생되는 사용후연료를 2016년에 중간저장시설이 완료되기 전까지는 원전부지 내에 보관하도록 결정되어 있다. 하지만 원전 소내의 사용후연료 저장시설로 이용 가능한 부지가 제한되어 있고, 특히 단위전력 생산량당 사용후연료 발생부피가 PWR형 원전보다 월등히 많은 CANDU형 원전이 있는 월성원전 같은 경우에는 현재 운영중인 Concrete Silo보다 사용후연료를 더욱 조밀하게 저장할 수 있는 새로운 조밀건식저장시설이 필요하게 되었다. 그림 2는 현재 캐나다 Gentilly 2에 설치되어 운영중인 MACSTOR 건식저장모듈이다.

현재 월성에 운영중인 콘크리트 Silo에는 그림 3과 같은 60다발의 CANDU 사용후연료를 넣은 바스켓(Basket)이 9단으로 적재되어 있다. 인출된 CANDU 사용후연료는 수조내에서 바스켓에 장전되고 이 장전된 바스켓은 차폐작업창(Shielded Work Station)으로 옮겨져 완전히 건조, 밀봉된다. 이 건조, 밀봉된 바스켓을 운반 플라스크를 사용하여 콘크리트 Silo로 운반한 후 저장한다. 이 바스켓 및 차폐작업창의 개념은 향후 개발할 조밀건식저장모듈에서도 계속 사용하는 것을 기준으로 한다.

본 연구에서는 사용후연료의 조밀저장에 따른 방사선원항 증가에 적합한 최적의 차폐두께를 결정하기 위하여 1차원 전산코드 SAS1[4]과 3차원 전산 코드인 QADS[5]를 사용하여 조밀건식저장모듈의 방사선차폐해석을 수행하였다.

2. 차폐해석

현재 개발중인 중수로 건식저장모듈의 개념설계를 위한 방사선차폐해석은 다차원 점커널 차폐해석 코드인 QADS 코드를 사용하였다. 이 QADS 코드는 사용자의 편의를 위하여 입력변수를 단순화시킨 SCALE 시스템의 한 모듈로서, 차폐체를 통과하는 감마선의 이동을 점커널방식으로 평가하는 다차원 차폐해석 코드이다. 작성된 입력변수들은 자동으로 기존의 QAD-CGGP 차폐해석코드의 입력변수로 변경되어 수행되며, 핵군단면적 및 기타 물성자료들은 SCALE 시스템 자료들을 이용한다.

2.1 방사선원항

차폐해석을 위한 방사선원의 계산은 사용후핵연료의 방사성핵종 구성비와 핵물질의 특성을 계산할 수 있는 ORIGEN-2[6] 코드를 사용하였다. 이 ORIGEN-2 코드는 원자로내에서 조사되는 기간동안 핵연료 집합체의 핵분열생성물, 방사화생성물 및 Actinide와 그 딸핵종의 생성 및 붕괴를 계산하며, 냉각기간에 따른 에너지그룹별 중성자 및 감마선속을 계산해준다. 계산의 입력자료로 사용한 중수로 연료다발의 특성 및 재원은 표 1에 나타내었다.

선원항으로 사용될 기준연료는 연소도 7,800MWD/MTU, 냉각기간 6년인 중수로 사용후연료로 가정하였다. 표 2와 3에는 각각 ORIGEN-2에서 생성된 에너지 구간별 감마선 스펙트럼과 중성자속을 나타내었다. 또한 ORIGEN-2 코드로 계산된 사용후연료의 방사능 및 붕괴열을 표 4에 나타내었다.

2.2 방사선차폐해석 모델링

먼저 그림 4에는 QADS 코드로 계산된 현재 설계중인 건식저장모듈의 단면을 나타내었다. 콘크리트 구조물 내에 40개의 실린더가 구성되어 있고, 그 실린더 내에는 60개의 핵연료 다발을 저장하는 그림 2와 같은 바스켓 10개가 각각 저장된다. 실린더내 바스켓은 그림 5와

같이 내부를 균질화시켜 UO_2와 Zr의 비율로 나타내었으며, 이 바스켓의 재원은 표 5에 나타내었다. 바스켓 외부의 실린더는 0.95cm의 두께를 가지는 카본스틸로 구성되어 있고 그 외부에 콘크리트 차폐체가 위치하는 것으로 모델링하였다.

해석은 대상물과 동일한 구조물로 모델링하는 것이 원칙이겠으나, 저장시설과 같은 복잡한 형태의 구조물을 기하학적 모델링하는 것은 개념설계단계에서는 불필요한 과정이므로 방사선적 보수성을 고려하여 실제 대상물과 근사한 구조의 모델을 해석 대상으로 하였으며, 외부 차폐체는 모듈에서 가장 얇은 콘크리트 두께를 갖는 측면 중앙부 두께의 콘크리트 실린더로 모델링하였다. 그림 4와 같은 40개의 실린더를 가지는 저장시설을 단순한 원통형 차폐체를 가지는 구조물로 가정하였다. 측면의 경우, 그림 6의 12개 대상 실린더 각각을 계산하여 그에 대한 값들을 합산하였으며, 상부의 경우 계산 모델은 그림 7과 같이 구성하였다.

QADS는 감마선량률 계산 코드이므로 중성자에 대한 계산에는 적용하기 어렵다. 중수로에서 타고 난 사용후연료의 경우, SAS1 코드를 사용하여 조밀건식저장모듈의 측면에 대한 중성자방사선량을 간략히 계산해 본 결과, 중성자 선원이 감마선원에 비해 10^{-4} 배 정도의 크기를 보이는 것으로 나타났고, 모듈 두께 결정을 위한 개념설계에서는 중성자선량에 의한 두께 변화폭은 무시할 수 있을 것으로 판단하였다. 이에 본 계산에서는 중성자에 의한 방사선량률은 평가하지 않았다. 그림 8은 QADS 코드에 사용된 해석모델을 나타내었다.

2.3 차폐해석 결과

QADS 코드를 이용해 계산된 외부차폐체인 콘크리트 두께의 변화에 따른 측면과 상부의 최대방사선량률을 각각 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 본 연구에서는 외부방사선량률 기준치를 1주당 1mSv 로 하였다[7,8].

그림 9는 건식저장모듈 측면에서의 외부차폐체(콘크리트) 두께에 따른 최대방사선량률의 변화를 나타내었다. 그림 6의 12개의 실린더 각각을 계산한 결과를 합한 결과, 표면 최대선량률 25μSv/hr를 기준으로 했을 때 콘크리트 차폐체의 두께가 96cm면 만족하는 것으로 나타났다.

상부의 콘크리트 두께에 따른 최대 방사선량률의 변화는 그림 10에 나타내었다. 상부 차폐체의 최대방사선량률은 그림 7의 9개의 저장실린더에 대한 각각의 합으로 나타난다. 상부의 콘크리트 두께는 표면 최대선량률 6μSv/hr를 기준으로 했을 때 108cm면 만족하는 것으로 나타났다.

3. 결론 및 향후수행 계획

본 연구에서는 향후 월성 원전에 적용할 조밀건식저장모듈의 외부 차폐체 두께를 결정하는 방사선차폐해석을 수행하였다. 캐나다의 기준이 1m 거리에서의 방사선량률 제한치가 200μSv/hr인 반면, 현재 우리 나라의 경우, 저장시설의 표면이나 1m 지점에서의 방사선량률에 대한 기준치가 정해져 있지 않다.

조밀건식저장모듈의 상부에서 사용후연료 하역 및 장전작업을 수행하므로 상부에서의 방사선량률 기준치를 6μSv/hr로 하였으며, 모듈 측면에서는 주로 주기적으로 방사선량률 측정을 하므로 방사선량률 기준치를 25μSv/hr로 하였다.

따라서 차폐계산 결과 조밀건식저장모듈의 측면 및 상부의 차폐체 두께가 각각 96cm 및 108cm 이상이면 방사선 측면에서 충분하다고 판단된다.

현재 개발중인 사용후연료 조밀건식저장모듈은 자연대류방식으로 냉각되며 모듈 측면의

하부와 상부에 각각 공기 입구 및 출구가 위치하게 된다. 이 공기의 입출구에서는 직접방사선에 의한 영향뿐만 아니라 산란방사선에 의한 영향도 평가하여야한다. 이에 따라 향후 방사선차폐해석은 몬테칼로 방법을 적용한 3차원 전산코드인 MCNP4b를 사용하여 공기 입출구에서의 방사선 차폐해석을 수행할 예정이다. 또한 조밀건식저장시설의 부지경계에서의 외부방사선량률에 대한 해석도 병행해서 수행할 예정이다.

5. 참고문헌

1. 한국전력공사, 월성원자력1호기 최종안전성분석보고서, 1997.
2. 원자력환경기술원, 월성 조밀저장방식 설계기술확보, 1998.
3. 원자력환경기술원, 월성 조밀저장방식 설계기술확보, 1999.
4. J. R. Knight, C. V. Parks, S. M. Bowman, L. M. petrie and J. A. Bucholz, "SAS1: A One
Dimensional Shielding Analysis Module", ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6, 1998.
5. B. L. Broadhead and M. B. Emmett, "QADS: A Multidimensional Point-Kernel Analysis
Module", ORNL/NUREG/CSD-2/V1/R6, 1998.
6. A. G. "Croff, A user's manual for the ORIGEN2 computer code", ORNL/TM-7174, Oak
Ridge National Laboratory, 1980.
7. 과학기술부고시 제2001-2호, *"방사선방호등에 관한 기준"*, 2001.
8. 원자력법 시행규칙, *"방사선안전관리등의 기술기준에 관한 규칙"*, 2001.

표 1. 중수로 핵연료다발 재원

Item(Unit)		Dimension	Item(Unit)		Dimension
UO2 Pellet	Density(g/cm3)	10.6	Bundle	Diameter(mm)	102
	Diameter(mm)	12.2		Length(mm)	495
	Length(mm)	15.6		No. of elements(ea)	37
Element	Outer diameter(mm)	13.1		U weight(kg)	18.8
	Length(mm)	492.7		UO_2 weight(kg)	21.326
	No. of pellets/stack(ea)	31		Zircaloy weight(kg)	2.331
	UO2 stacklength(mm)	482			

표 2. CANDU S/F 1Mt 당 감마선 스펙트럼
(연소도 7,800MWD/MTU, 냉각기간 6년)

Group	Energy(Mev)	Photons/sec	Group	Energy(Mev)	Photons/sec
1	1.00E-02	6.770E+14	10	8.50E-01	1.159E+14
2	2.50E-02	1.608E+14	11	1.25E+00	4.201E+13
3	3.75E-02	1.677E+14	12	1.75E+00	1.317E+12
4	5.75E-02	1.338E+14	13	2.25E+00	8.776E+11
5	8.50E-02	8.417E+13	14	2.75E+00	2.810E+10
6	1.25E-01	7.713E+13	15	3.50E+00	3.591E+09
7	2.25E-01	7.209E+13	16	5.00E+00	1.376E+05
8	3.75E-01	4.312E+13	17	7.00E+00	1.579E+04
9	5.75E-01	1.008E+15	18	9.50E+00	1.810E+03
			Total	Total	2.584E+15

표 3. CANDU S/F 1Mt 당 중성자속
(연소도 7,800MWD/MTU, 냉각기간 6년)

Type	Neutrons/sec
(Alpha, n)	5.886E+05
Spont. Fission	2.790E+06
Total	3.379E+06

표 4. CANDU S/F 1Mt 당 방사능 및 붕괴열

Fuel Type 1/6/12/18		
방사능(Ci)	Activation products	4.861E+02
	Actinide and Daughters	1.816E+04
	Fission Products	1.034E+05
	Total	1.220E+05
붕괴열(w)	Activation products	2.854E+00
	Actinide and Daughters	2.310E+01
	Fission Products	3.054E+02
	Total	3.314E+02

표 5. CANDU 사용후연료 바스켓 재원

Unit	Dimension
Overall height (cm)	55.6
Cover OD (cm)	104.0
Top/bottom plate OD (cm)	107.0
Thickness - Top (cm)	0.95
- side (cm)	0.95
- base (cm)	1.91
Material	Type 304L SS
Capacity (no. of bundles)	60
Basket gas	air

그림 1. 현재 월성에서 운영중인
Concrete Silo 방식의 건식저장시설

그림 2. 현재 Gentilly-2에서 운영중인 MACSTOR 건식저장모듈

그림 3. 현재 월성에서 사용중인 바스켓과 동일한 형태의 바스켓

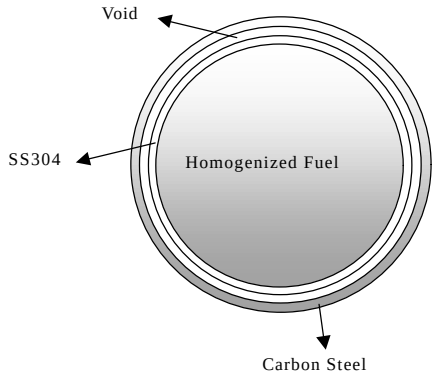

그림 5. 계산에 사용된 실린더 모델

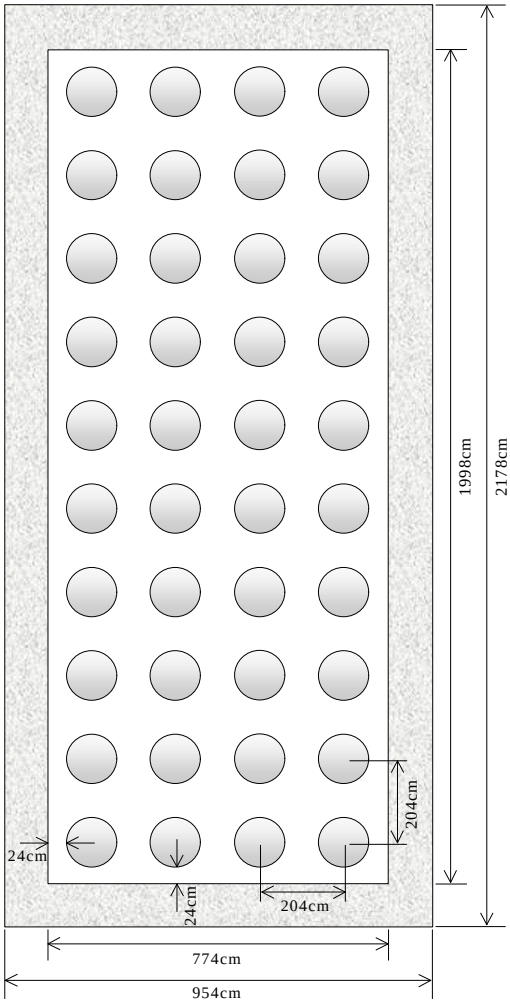

그림 4. 건식저장시설 단면도

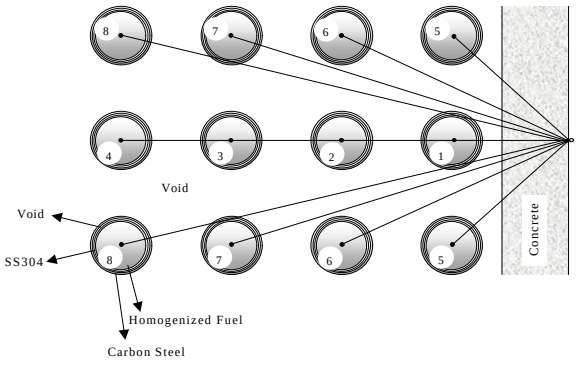

그림 6. 측면차폐해석 대상 실린더

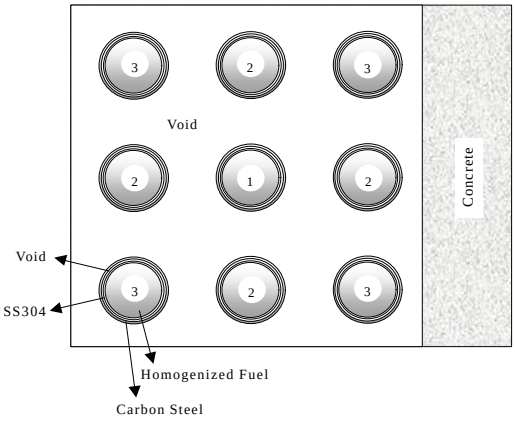

그림 7. 상부차폐해석 대상 실린더

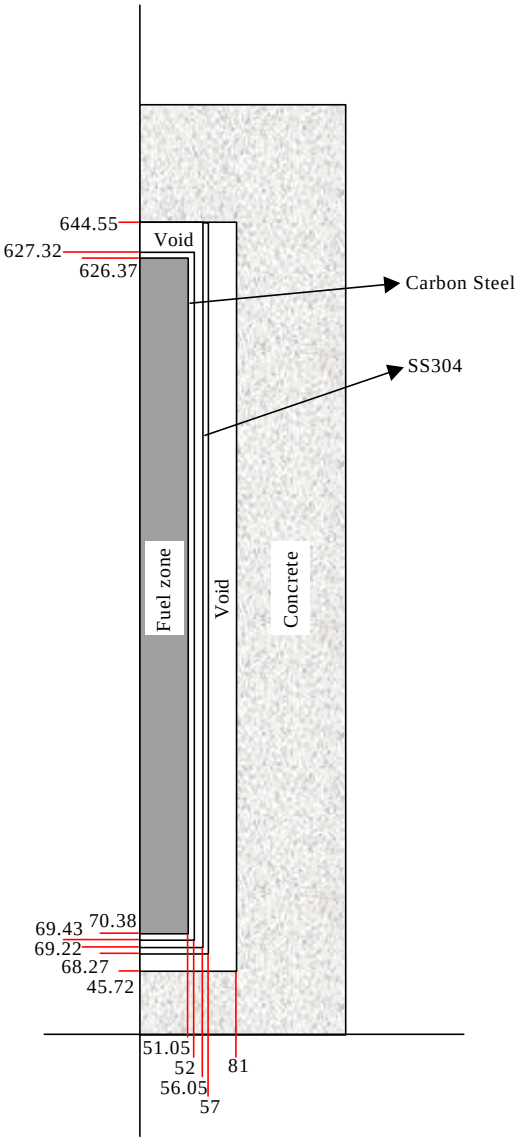

그림 8. QADS 차폐해석 모델

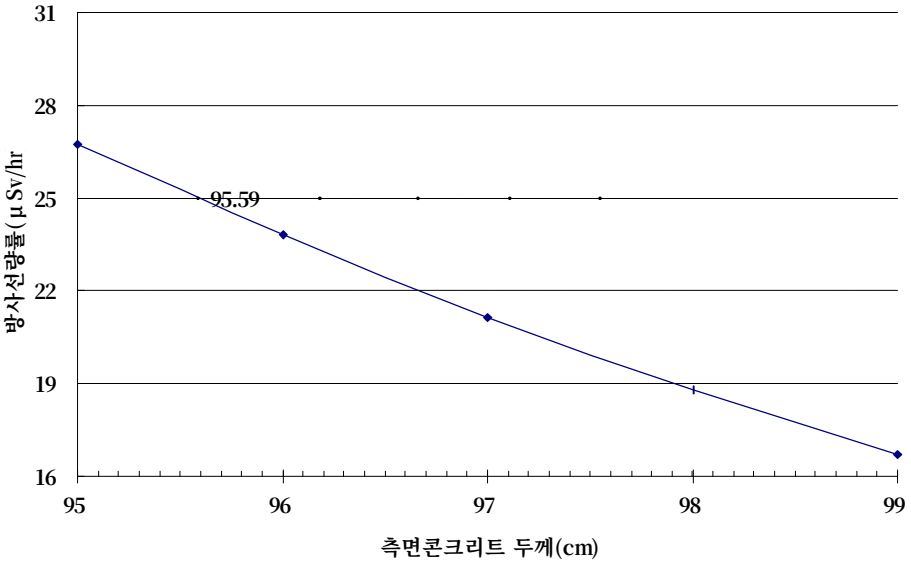

그림 9. 측면차폐체(외부콘크리트) 두께에 따른 최대방사선량률 변화

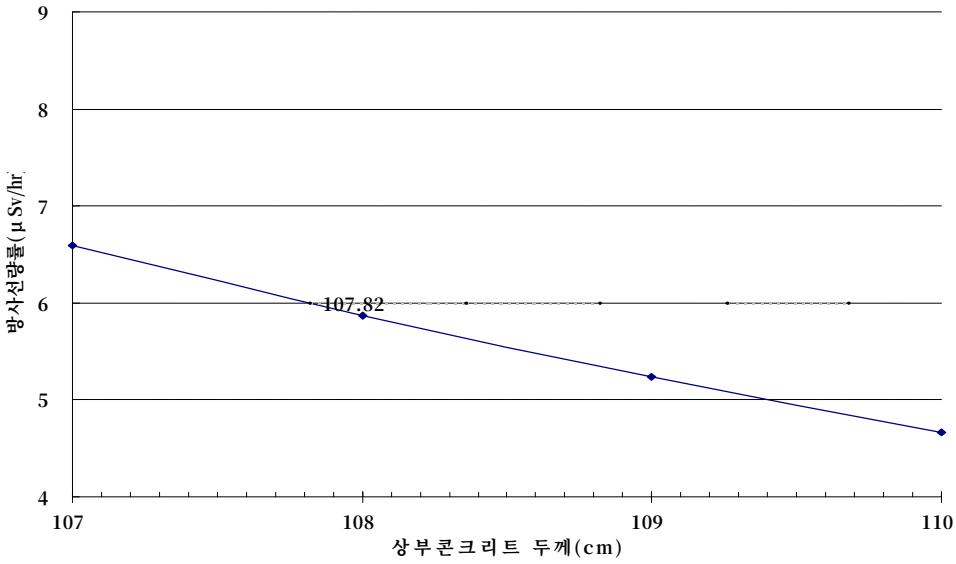

그림 10. 상부차폐체(외부콘크리트)두께에 따른 최대방사선량률 변화