

## Development of a Simplified Source Term Estimation Model for a Spent Fuel from Westinghouse-type Reactors

### 웨스팅하우스형 원전 사용후핵연료에 대한 방사선원항 예측 모델 개발

Dong-Keun Cho<sup>1)</sup>, Dong-Hak Kook, Heui-Joo Choi and Jong-Won Choi  
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero Yuseong-gu, Daejeon

조동건<sup>1)</sup>, 국동학, 최희주, 최종원  
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received July 05, 2010 / Revised July 29, 2010 / Approved September 06, 2010)

#### Abstract

There are 11,811 LWR spent fuels stored at reactor sites, as of 2009. Source terms based on reference spent fuel which represents entire spent fuels with bounding values in the aspect of source term has been applied to a design of nuclear installations, instead of those which are generated by weighting respective source term for each spent fuel. Simplified regression models to estimate total decay heat, radioactivity, and ingestion hazard index for spent fuel from Westinghouse-type reactors were developed in this study, because it can be used as a fundamental model for weighting source term for respective spent fuel to exclude conservativeness in source terms. It was found that the estimated source terms agreed with calculated value from ORIGEN-ARP within 5%. It was also found that the conservativeness could be excluded if the weight source terms were used as reference source term in the design. Therefore, it is expected that the developed regression model could be widely used in the conceptual design process of nuclear facilities related with storage and disposal of spent nuclear fuel.

**Key words** : spent nuclear fuel, source term, discharge burnup, regression model, disposal system design.

#### 요 약

2009년말 기준으로 11,811 다발의 경수로 사용후핵연료가 방출되었으며, 지금까지 각 사용후핵연료에 대해 방사선원항을 가중하여 설계에 반영하기는 사실상 불가능하여, 원자력 관련시설 설계시 보수성을 갖는 기준 사용후핵연료를 선정하고 이를 바탕으로 시스템 설계를 수행하여 왔다. 방사선원항에 대한 단순모델을 적용하면 각 사용후핵연료에 대한 방사선원항을 가중함으로써 이와 같은 보수성을 배제할 수 있으므로 본 연구에서 웨스팅하우스형 원전에 사용된 사용후핵연료를 대상으로 방사선원항, 즉, 붕괴열, 방사능세기, 섭취위해도 등을 예측하기 위한 회귀모형을 개발하였다. 개발된 회귀식을 통해 예측된 방사선원항 값은 ORIGEN-ARP 코드로 계산된 값과 약 5% 이내에서 잘 일치함을 확인하였으며, 이의 유용성을 검토한 결과 각각의 사용후핵연료에 대한 방사선원항을 가중하여 설계에 반영하면 보수성을 줄일 수 있음을 확인

1) Corresponding Author. E-mail : dkcho@kaeri.re.kr

하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 회귀식은 사용후핵연료의 저장 및 처분과 관련한 원자력시설 설계시 개념설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

**중심단어** : 사용후핵연료, 방사선원항, 방출연소도, 회귀식, 처분시스템 설계

## I. 서론

국내 20기의 원자력발전소를 운영함으로써 발생하는 사용후핵연료는 매년 700톤 정도이며, 2009년 12월 말 기준으로 총 사용후핵연료 발생량은 약 10,761톤(이중 가압경수로 사용후핵연료 4,867톤)이다[1]. 이처럼 많은 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 방안을 마련하기 위해 정부 및 학계에서 다각적으로 노력중이나[2,3], 현재까지 사용후핵연료의 장기관리에 관한 확고한 국가정책은 미확정인 상태로 남아 있다.

각 원전에서 발생하는 사용후핵연료는 장전시 핵연료의 초기 농축도 및 방출연소도가 다르고, 노심설계 특성이 다르므로 같은 초기 농축도를 갖더라도 핵연료가 원자로 내에서 조사됨에 따라 갖게 되는 방사선원항, 즉, 핵종량, 붕괴열, 방사능세기, 섭취위해도 등의 특성이 다르다. 다시 말해, 2009년말 기준으로 11,811 다발의 경수로 사용후핵연료가 방출되었지만, 같은 방사선원항을 갖는 사용후핵연료는 없다.

이처럼 다양한 사용후핵연료에 대해 각각의 사용후핵연료 방사선원항을 고려하여 처분시스템 설계에 반영하는 것은 사실상 불가능하며, 따라서 파이로 공정시스템 설계, 처분시스템 설계시 모든 사용후핵연료를 대상으로 보수성을 갖는 기준 사용후핵연료를 선정하고 이를 바탕으로 시스템 설계를 수행하였다[4,5,6].

그러나 앞서와 같은 방법은 많은 보수성을 수반하게 된다. 즉, 한국형 처분시스템의 가압경수로용 사용후핵연료 처분용기에는 4 개의 집합체가 장전되는데[7], 처분용기 개념설계 시 기준 사용후핵연료로 고려되었던 초기 농축도 4.0 wt.%, 방출연소도 45,000 MWd/tU, 냉각기간 40년인 사용후핵연료가 모두 장전되는 경우는 거의 불가능하다. 따라서 이와 같은 보수성을 배제하기 위해서는 각 사용후핵연료에 대한 방사선원항 값을 가중하여 방사선원항을 적용하여야 한다. 그런데, 이를 위해 각 사용후핵연료마다 ORIGEN-S, ORIGEN-ARP, TRITON 과 같은 방사선원항 평가 코드로 직접 선원항 값을 산출하고 이를 가중하기에는 많은 시간을 요하므로 공학적으로 효율성이 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 여러 개의 가압경수로 사용후핵연료가 어떤 시스템 내에 존재할 때, 각각의 방사선원항 특성을 고

려하여 방사선원항을 쉽게 산출할 수 있도록 붕괴열, 방사능세기, 섭취위해도 등에 대한 근사 모델을 개발하였다.

## II. 단순모델 개발을 위한 사용후핵연료 방사선원항 정량 분석

### 가. 해석방법론

#### ① 해석체계

가압경수로 사용후핵연료에 대한 방사선원항 특성분석을 위해서는 원자로 내에서의 핵분열 및 중성자 흡수에 의한 핵종생성을 추적해야 하며, 원자로 방출 후 각 핵종들의 자연붕괴에 의한 핵종생성 및 소멸을 모사해야 한다. 사용후핵연료 성능평가 코드로 ORIGEN2 및 ORIGEN-ARP을 사용할 수 있다. 본 해석에서는 미국 원자력규제위원회의 지원 하에 오리지널 국립연구소에서 지속적으로 개발 중에 있는 ORIGEN-ARP을 사용하였다.

#### ② 해석방법론

본 연구에서 사용한 ORIGEN-ARP 코드에서 취급하고 있는 시간  $t$ 에서의 연소 및 냉각에 따른 핵종 변화율을 모사하는 지배방정식은 식 (1) 과 같다. 식 (1)은 핵종  $i$ 의 변화율은 선행핵종의 붕괴와 선행핵종의 중성자흡수반응에 의한 생성률과 자신의 붕괴와 중성자흡수반응에 의한 손실률의 차와 같음을 의미한다.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j \delta_{ij} \lambda_j N_j + \sum_k f_{ik} \sigma_k \Phi N_k - (\lambda_i + \sigma_i \Phi) N_i \dots \dots (1)$$

여기서,  $N_i$  = 핵종  $i$ 의 수밀도,

$\lambda_i$  = 핵종  $i$ 의 붕괴상수,

$\sigma_i$  = 스펙트럼이 가중된 핵종  $i$ 의 중성자 흡수단면적,

$\delta_{ij}$  = 핵종  $j$ 에서  $i$ 로의 방사성 붕괴분율,

$f_{ik}$  = 핵종  $k$ 의 중성자흡수로 인한  $i$ 로의 변환 분율,

$\Phi$  = 스펙트럼 및 공간에 대해 평균된 중성자속을 의미한다.

식 (1)에서 중성자속이 관여하는 항은 원자로내 연소반응 해석시만 기여하며, 원자로 방출후 냉각 계산시는 중성자에 의한 반응은 무시할 수 있으므로 기여하지 않게 된다.

본 연구에서 식 (1)을 각 핵종별로 해석하기 위해 필요한 핵반응단면적라이브리리는 웨스팅하우스형 원전에 사용되는 핵연료가 원자로 내에 장전되어 연소되는 조건에서의 중성자 스펙트럼을 가중하여 생성한 17×17 핵반응단면적라이브리리를 사용하였다.

**나. 회귀식 개발을 위한 정량분석**

단순모델은 기본적으로 ORIGEN-ARP 해석결과를 이용하여 개발되었다. 우선 해석대상 사용후핵연료 선정을 위하여 기존 웨스팅하우스 원전에서 발생한 사용후핵연료를 대상으로 초기농축도와 방출연소도와의 상관관계를 분석하고, 이를 바탕으로 사용후핵연료의 초기농축도와 방출연소도 셋(set)을 구성하였다. 그림 1은 기존 웨스팅하우스 원전에서 발생한 사용후핵연료의 초기농축도와 방출연소도와의 상관관계를 보여 준다. 3.2 wt.%(초기농축도) - 30,000 MWd/tU(방출연소도), 3.5 wt.% - 35,000 MWd/tU, 3.8 wt.% - 40,000 MWd/tU, 4.2 wt.% - 45,000 MWd/tU, 4.5 wt.% - 50,000 MWd/tU 셋(set)에 대해 ORIGEN-ARP로 정량분석을 수행하고 이 결과를 기초로 회귀모델을 개발하였다.

각 사용후핵연료는 원자로 내에서 16개월 연소, 50일 동안 재장전(자연붕괴)됨을 가정하였으며, 이와 같은 조건으로 3주기 연소 후 각 사용후핵연료가 해당 방출연소도 값에 도달 할 수 있도록 비출력(Watts/gU) 값을 적용하였다. 사용후핵연료 1 MtU을 기준으로 도출하였으며, 계산시 이에 상응하는 구조재의 양도 고려하였다. 조사된 핵연료의 연소도는 비출력과 유효전출력기간(effective full power day)의 곱으로 표현된다. 본 연구에서 해당 방출연소도에 도달하도록 연소기간은 고정하고 비출력 값을 변경하였는데, 동일한 연소도에 대해 연소기간 및 비출력 값이 다르더라도 냉각기간 5년 이후에는

약 1%의 오차범위에서 같은 값을 갖는다. 즉, 냉각기간 수년 이상에서는 연소도만 같으면 방사선원형은 연소기간 및 비출력 값에는 크게 영향을 받지 않는다.

**Ⅲ. 방사선원형 예측을 위한 단순모델 개발**

**가. 회귀식 개발**

붕괴열, 방사능세기, 섭취위해도 등을 쉽게 평가하기 위해 개발된 회귀식은 기본적으로 식 (2)의 형태를 따르고 있으며, 붕괴열, 방사능, 섭취위해도 등이 변화하는 특성을 보면, 냉각시간에 따른 변화형태가 기본적으로 같고, 방출연소도에 따른 절대값만 다르므로 기본적인 형태(general form)를 나타내는  $\alpha$ 에 방출연소도를 고려하여 보정하는 값인  $\beta \times \gamma$  값을 더해줌(때론 빼줌)으로써 방출연소도 및 냉각시간에 따른 사용후핵연료의 방사선원형 값을 생산하도록 하였다. 식 (2)에서 Value는 붕괴열, 방사능, 섭취위해도 등을 의미한다.

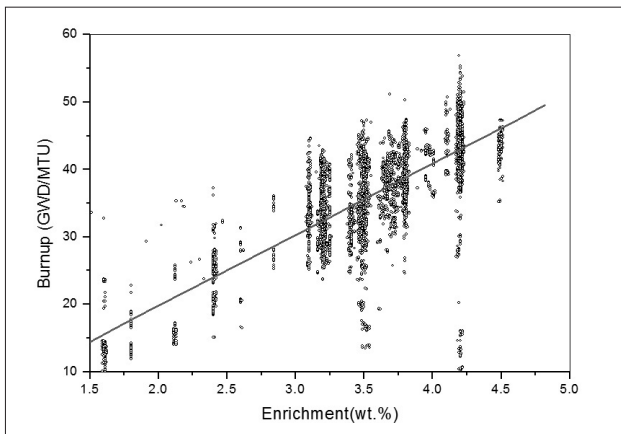
$$Value = \alpha + \beta \times \gamma \dots\dots\dots (2)$$

회귀식은 1~10<sup>6</sup>년까지의 냉각기간을 대상으로 연소도 및 냉각기간의 함수로 도출하였다. 1~10<sup>6</sup>년까지의 냉각기간 전체를 하나의 회귀식으로 도출하면 회귀식이 냉각시간에 따른 값을 잘 추적하지 못하므로 민감도분석을 통해 세 개의 냉각기간, 즉, 1~30년, 30~300년, 300~10<sup>6</sup>년에 대해 각 회귀식을 도출하였다. PWR 사용후핵연료를 대상으로 도출된 붕괴열에 대한 회귀식 및 회귀계수는 표 1, 방사능은 표 2, 섭취위해도는 표 3에 각각 나타내었다.

**나. 회귀식 검증**

개발된 회귀식에 대해 타당성을 입증하기 위해 ORIGEN-ARP으로 계산된 해석 값과 회귀식을 통해 예측된 값을 비교 하였다. 그림 2 및 3은 붕괴열에 대해 회귀식으로 예측한 값과 ORIGEN-ARP로 직접 계산한 값을 비교한 그래프이다. 그림 2 및 3에서 보는 바와 같이 상호간에 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며, 특히 그림 3을 보면, 1,000년 이내의 시점에서는 약 5% 이내에서 상호간에 일치하여 예비설계 단계에서는 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

그림 4 및 5는 총 방사능세기 및 위해지수에 대한 상호비교 결과를 보여주고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 상호간에 잘 일치하고 있으며, 정량적인 차이도 붕괴열에서와 마찬가지로 약 5% 이내에서 잘 일치하였다.



**Fig. 1. Relation between initial enrichment and discharge burnup for spent fuels from Westinghouse-type reactors.**

**Table 1. Regression model and coefficients for decay heat.**

	Category	Time [years]	Equation	Constant
$\alpha$	Fitting	1 ~ 30	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_3}\right)}$	y0 = 4.908966E+02 A1 = 7.679070E+03, t1 = 1.797920E+00 A2 = 1.045528E+03, t2 = 2.488088E+01 A3 = 1.322184E+04, t3 = 8.543600E-01
		30 ~ 300	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)}$	y0 = 4.490509E+01 A1 = 1.132256E+03, t1 = 4.379002E+01 A2 = 2.034482E+02, t2 = 3.939357E+02
		300 ~ 10 <sup>6</sup>	$\alpha = a \cdot x^b$	a = 8.533352E+03, b = -7.193700E-01
$\beta$	Weighting	1 ~ 300	$\beta = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_3}\right)}$	y0 = 17.23509, x0 = 0.23599 A1 = 1102.09085, t1 = 1.29539 A2 = 298.05839, t2 = 4.41315 A3 = 204.66334, t3 = 54.00279
		3 × 10 <sup>2</sup> ~ 3 × 10 <sup>4</sup>		y0 = 0.27076, x0 = -2511.04593 A1 = -733.76391, t1 = 3622.04249 A2 = 2784.07004, t2 = 552.36651 A3 = 728.61222, t3 = 3663.67428
		3 × 10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	$\beta = a \cdot x^b$	a = 308.48779, b = -0.68194
$\gamma$	Burnup	all range	$\gamma = (\text{Burnup} - 35) / 5$	
Input Variable : [year], burnup [GWd/MtU] Final Output : <b>Decay Heat</b> = $\alpha + (\beta \times \gamma)$ , <b>Watt/MtU</b>				

**Table 2. Regression model and coefficients for radioactivity.**

	Category	Time [years]	Equation	Constant
$\alpha$	Fitting	1 ~ 30	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_3}\right)}$	y0 = 9.016602E+04 A1 = 5.430436E+05, t1 = 2.384940E+01 A2 = 1.528686E+06, t2 = 1.878550E+00 A3 = 3.017734E+06, t3 = 9.055100E-01
		30 ~ 300	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)}$	y0 = 4.156295E+03 A1 = 2.352309E+05, t1 = 5.000588E+01 A2 = 2.999008E+05, t2 = 2.801968E+01
		300 ~ 10 <sup>6</sup>	$\alpha = a \cdot x^b$	a = 3.042961E+05, b = -7.325000E-01
$\beta$	Weighting	1 ~ 300	$\beta = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_3}\right)}$	y0 = 559.71304, x0 = 0.15743 A1 = 29187.41507, t1 = 6.04885 A2 = 191041.7258, t2 = 1.46839 A3 = 59636.81392, t3 = 40.86193
		3 × 10 <sup>2</sup> ~ 3 × 10 <sup>4</sup>		y0 = 11.37008, x0 = -2470.21524 A1 = -63085.41625, t1 = 4142.0681 A2 = 133198.8947, t2 = 502.15324 A3 = 63053.18504, t3 = 4155.18836
		3 × 10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	$\beta = a \cdot x^b$	a = 2195.33843, b = -0.50773
$\gamma$	Burnup	all range	$\gamma = (\text{Burnup} - 35) / 5$	
Input Variable : [year], burnup [GWd/MtU] Final Output : <b>Radioactivity</b> = $\alpha + (\beta \times \gamma)$ , <b>Curies/MtU</b>				

**Table 3. Regression model and coefficients for ingestion hazard index.**

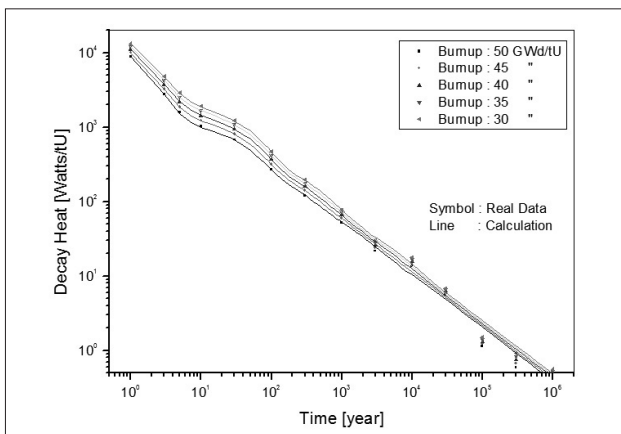
	Category	Time [years]	Equation	Constant
$\alpha$	General Form	1 ~ 30	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_3}\right)}$	y0 = -1,529380E+10 A1 = 1,566411E+11 t1 = 2,945641E+01 A2 = 1,598310E+11 t2 = 6,511636E+01 A3 = 1,977448E+11 t3 = 1,260960E+00
		30 ~ 300	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x}{t_2}\right)}$	y0 = 1,081586E+09 A1 = 1,466729E+11 t1 = 4,099393E+01 A2 = 1,466729E+11 t2 = 4,099393E+01
		300 ~ 10 <sup>6</sup>	$\alpha = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_3}\right)}$	y0 = 5,477266E+07 x0 = 2,921808E+01 A1 = 4,375762E+10 t1 = 5,662534E+01 A2 = 9,439733E+08 t2 = 7,759008E+02 A3 = 1,049437E+08 t3 = 1,247778E+04
$\beta$	Bumup Weighting Form	1 ~ 300	$\beta = y_0 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_1}\right)} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_2}\right)} + A_3 \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{t_3}\right)}$	y0 = 1,252047E+08 x0 = -2,671970E+00 A1 = 7,203654E+10 t1 = 1,405140E+00 A2 = 3,145802E+10 t2 = 4,133913E+01 A3 = 6,537647E+09 t3 = 4,170630E+00
		3 × 10 <sup>2</sup> ~ 3 × 10 <sup>4</sup>		y0 = 4,839842E+06 x0 = -1,330955E+03 A1 = -1,271987E+10 t1 = 3,324422E+03 A2 = 3,841549E+09 t2 = 4,872931E+02 A3 = 1,271658E+10 t3 = 3,331386E+03
		3 × 10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup>		y0 = -3,048595E+08 x0 = -9,744935E+06 A1 = -2,366668E+10 t1 = 1,996750E+06 A2 = -8,790208E+10 t2 = 1,332595E+06 A3 = 4,355238E+09 t3 = 4,701943E+06
$\gamma$	Bumup Correction Value	all range	$\gamma = (\text{Bumup} - 35) / 5$	A2 = -8,790208E+10 t2 = 1,332595E+06 A3 = 4,355238E+09 t3 = 4,701943E+06
Input Variable : [year], bumup [GWd/MtU] Final Output : Toxicity = $\alpha + (\beta \times \gamma)$ , m <sup>3</sup> -water/MtU				

**다. 단순 모델의 유용성 평가**

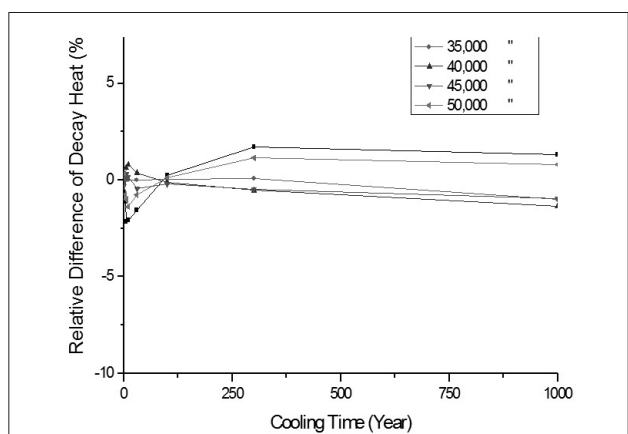
한국형 처분용기에 서로 다른 사용후핵연료가 장입되었을 경우, 발생하는 붕괴열, 방사능 세기, 섭취위해도를 단순모델을 적용해 검증하여 평가해봄으로써 단순모델의 적용으로 인한 보수성의 배제효과를 검토해 보았다.

예제 문제는 냉각기간 40년인 사용후핵연료 다발이 가압경수로 처분용기에 거치되는 경우로서 각 사용후핵연료

의 방출연소도는 그림 6을 바탕으로 선정하였다. 그림 6은 한국원자력연구원에서 개발한 사용후핵연료 데이터분석 프로그램[7]을 이용하여 생성한 웨스팅하우스형 원전에서 2000년에 발생한 사용후핵연료를 각 해당 방출연소도별로 물량을 도출한 것이다. 2000년 시점을 선택한 이유는 한국형 처분시스템 개발시 2040년에 운영됨을 가정하여 설계하였으며, 2040년 시점에 40년 냉각이 이루어진



**Fig. 2. Comparison of decay heat calculated by ORIGEN-ARP and regression model.**



**Fig. 3. Relative difference of decay heat calculated by ORIGEN-ARP and regression model.**

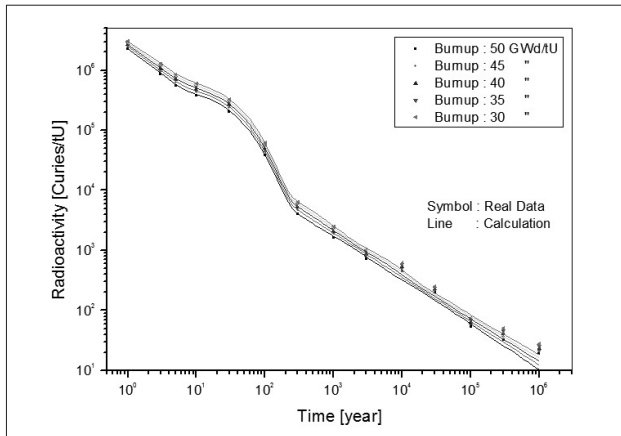


Fig. 4. Comparison of radioactivity calculated by ORIGEN-ARP and regression model.

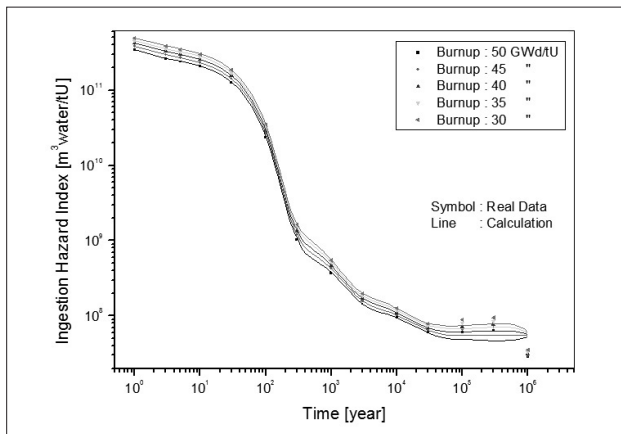


Fig. 5. Comparison of ingestion hazard index calculated by ORIGEN-ARP and regression model.

사용후핵연료는 2000년에 발생한 사용후핵연료이기 때문이다.

각 방출연소도별 물량 비율을 감안하여 처분용기에는 40,000 MWd/tU를 갖는 사용후핵연료 1 다발, 42,500 MWd/tU를 갖는 사용후핵연료 2 다발, 47,500 MWd/tU의 방출연소도를 갖는 사용후핵연료 1 다발이 장전됨을 가정하였다. 그림 7에는 한국형 가압경수로 처분용기의 그림을 참고로 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 한 개의 처분용기에는 4 다발의 사용후핵연료가 거치된다[8].

표 4에는 이 사용후핵연료가 처분용기에 장전되었을 경우, 기존에 사용했던 방법인 기존 사용후핵연료를 이용하여 방사선원향을 산출한 경우와, 본 연구에서 개발한 단순모델을 적용하여 4 개의 사용후핵연료 각각의 방사선원향을 가중하여 산출한 총 방사선원향 값을 비교하였다. 이 표에서 보는 바와 같이, 붕괴열은 각각을 가중한 경우가 기존 사용후핵연료를 사용하는 경우에 비해 5% 정도 낮은 열량을 나

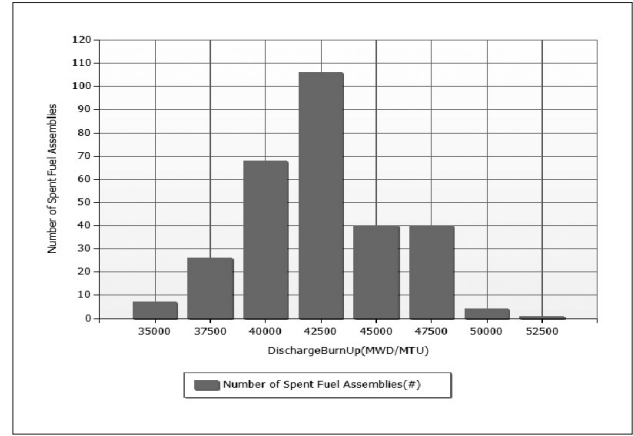


Fig. 6. Inventory versus discharge burnup of spent fuels from Westinghouse-type reactors.

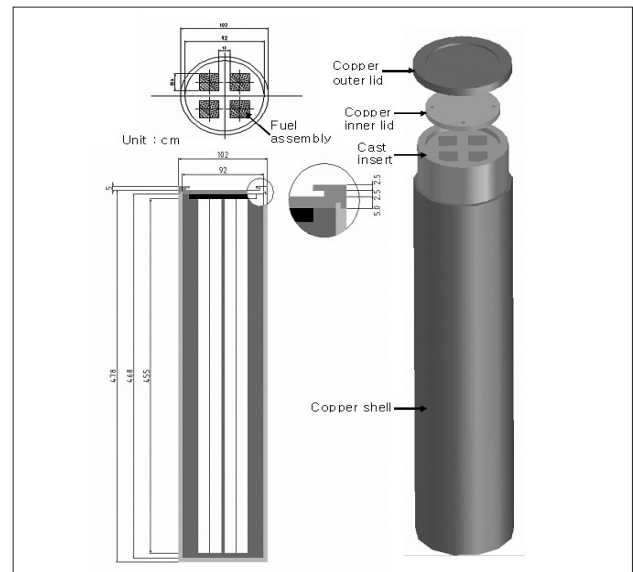


Fig. 7. Conceptual design KDC-1 disposal canister for PWR spent fuels.

타내고 있다. 이는 결국 처분용기 표면에서의 열속밀도 (Watts/cm<sup>2</sup>)를 낮추게 되고 이는 처분공의 간격 및 터널 간격을 좁히는 결과를 초래하여 처분 면적을 줄이는 결과로 직결된다[9]. 방사능의 세기 또한 기존 사용후핵연료를 사용한 경우에 비해 4% 정도 낮게 평가됨을 알 수 있으며, 섭취위해도도 낮게 평가되어 안전성에도 더 큰 마진을 초래함을 알 수 있다.

즉, 단순모델을 이용하여 실제 사용후핵연료 발생분포현황을 고려하여 각각의 사용후핵연료의 방사선원향을 추적하면 지나친 보수성을 배제할 수 있으므로 본 연구에서 개발된 단순모델을 이용하면, 향후 저장, 처분, 파이로 공정 개발시 개념설계 단계에서 보다 현실적인 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

**Table 4. Difference of source terms calculated by reference spent fuel and regression model.**

Year	Decay Heat (Watts/Canister)			Radioactivity (Curies/Canister)			Ingestion Hazard Index (Curies/Canister)		
	Bounding <sup>1)</sup>	Combination <sup>2)</sup>	Difference <sup>3)</sup> (%)	Bounding	Combination	Difference (%)	Bounding	Combination	Difference (%)
1	2.092E+04	2.022E+04	-3.4	4.976E+06	4.852E+06	-2.6	7.857E+11	7.619E+11	-3.1
5	4.347E+03	4.132E+03	-5.2	1.370E+06	1.323E+06	-3.6	5.570E+11	5.392E+11	-3.3
10	2.859E+03	2.717E+03	-5.3	9.658E+05	9.314E+05	-3.7	4.826E+11	4.674E+11	-3.3
40	1.571E+03	1.497E+03	-5.0	3.921E+05	3.773E+05	-3.9	2.310E+11	2.237E+11	-3.3
100	7.175E+02	6.855E+02	-4.7	9.620E+04	9.250E+04	-4.0	5.532E+10	5.355E+10	-3.3
300	3.047E+02	2.931E+02	-4.0	1.022E+04	9.837E+03	-3.9	2.697E+09	2.603E+09	-3.6
1,000	1.233E+02	1.193E+02	-3.4	4.018E+03	3.887E+03	-3.4	8.793E+08	8.505E+08	-3.4

1) 4개의 집합체 모두 기준 사용후핵연료로 간주한 경우  
 2) 각 사용후핵연료의 방사선원항을 가중한 경우  
 3) (Combination - Bounding)/Bounding × 100

#### IV. 결 론

2009년말 기준으로 11,811 다발의 경수로 사용후핵연료가 방출되었으며, 지금까지 각 사용후핵연료에 대해 방사선원항을 가중하여 설계에 반영하기는 사실상 불가능하여, 원자력 관련시설 설계시 보수성을 갖는 기준 사용후핵연료를 선정하고 이를 바탕으로 시스템 설계를 수행하여 왔다. 이와 같은 보수성을 배제하기 위해 본 연구에서는 방사선원항, 즉, 붕괴열, 방사능세기, 섭취위해도 등을 예측하기 위한 단순모델을 개발하였으며, 개발된 회귀식을 통해 예측된 방사선원항 값은 ORIGEN-ARP 코드로 계산된 된 값과 약 5% 이내에서 잘 일치함을 확인하였다. 또한 이의 유용성을 검토한 결과 각각의 사용후핵연료에 대한 방사선원항을 가중하여 설계에 반영하면 보수성을 줄일 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 회귀식은 사용후핵연료의 저장 및 처분과 관련한 원자력시설 설계시 개념설계 단계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구를 교육과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연구사업의 일환으로 수행하였습니다.

#### 참고문헌

[1] 2010 원자력안전백서, 한국원자력안전기술원, 2010.  
 [2] 이건재 외, 사용후핵연료에 관한 사회적 공론화 방안 연구 공론화 대상 선정 향후 추진방향에 대하여, 한국방사성폐기물학회, 2005.  
 [3] 황용수 외, 사용후핵연료 관리 공론화 방안 연구, 한국원자력연구원, KAERI/RR-2845/2007, 2007.

[4] 조동건, 최종원, 한필수, “심지층 처분시스템 설계를 위한 사용후핵연료 현황 분석 및 예측,” 방사성폐기물학회지, Vol. 4 (1), Mar. 2006.  
 [5] 조동건 외, “심지층 처분시스템 설계를 위한 중수로 사용후핵연료 현황 및 선원항 분석,” 방사성폐기물학회지, Vol. 6 (2) Jun. 2008.  
 [6] 조동건 외, “파이로공정 시설 개념설계를 위한 기준 사용후핵연료 선정,” 방사성폐기물학회지, Vol. 6 (3), Sept. 2008.  
 [7] 조동건 외, “사용후핵연료 특성 데이터 분석 프로그램 개발,” 한국방사성폐기물학회 학술논문요약집-2010년 봄-, May, 2010.  
 [8] 최희주 외, “고준위폐기물 처분기술 개발 : 처분시스템 개발,” 한국원자력연구원, KAERI/RR-2765/2006.  
 [9] Dong-Keun Cho, Yang Lee, Jong-Youl Lee and Jongwon Choi, “Characteristics of a Geological Disposal System for the Increasing Burn-up of Spent Nuclear Fuel in Korea,” Journal of Nuclear Science and Technology, Vo. 44 (10), 2007.