

## ORIGEN2 코드를 이용한 1차 냉각재 비방사능 평가 코드 개발

### A Computer Code Development for Evaluation of Primary Coolant Specific Activities using ORIGEN2 code

김병수, 강창순

서울대학교  
서울시 관악구 신림동 산56-1

김교윤, 지성균

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

기존의 발전용 PWR 뿐만 아니라, SMART와 같은 일체형 원자로에도 적용 가능한 범용의 1차 냉각재 핵분열생성물 방사능 평가코드 SAEP를 개발하였다. 냉각재 비방사능의 거동을 지배하는 비균질 형태의 1차 연립 미분 방정식의 해를 구할 수 있도록 ORIGEN2 코드를 SAEP의 부프로그램 형태로 모듈화하였다. 울진 원자력 3,4호기에 대하여 벤치마크를 수행한 결과에 의하면 SAEP에 의한 결과는 울진 원자력 3,4호기의 결과와 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 개발된 SAEP는 일체형 원자로를 포함한 여러 형태의 원자로에서의 1차 냉각재내 비방사능 평가에 효과적으로 이용되리라 기대된다.

#### Abstract

A computer program SAEP to evaluate specific activities due to fission products in the primary coolant was developed, which can be applied to the integral reactor such as SMART as well as commercial PWRs in existence. The ORIGEN2 code is integrated into the SAEP as a subroutine, which could solve the inhomogeneous differential equations to determine coolant activities. The benchmarking result for UCN 3 and 4 units shows that specific activities by the SAEP are very close to those of the conventional calculations. Therefore, it is expected that the SAEP developed in this study will be used practically in evaluation of specific activities in the primary coolant of various types of nuclear reactors including the integral reactor.

## 1. 서 론

현재 국내에서 330MWt 출력의 일체형 원자로인 SMART<sup>1</sup>가 개발되고 있다. 이 원자로는 대형출력을 위한 기존의 발전용 원자로와는 다른 일체형 구조로서, 노심과 1차 계통이 모두 원자로 압력 용기 안에 들어있다. SMART에 적용되는 설계특징들, 예를 들어, 노심과 가까운 위치에 존재하는 Titanium 재질의 Helical Type S/G, 운전중에는 정화를 하지 않는 운전특성, 3년 정도에 해당하는 핵연료 중장주기 특성, 330MWt에 이르는 중소규모 열 출력 등은 기존 발전용 원자로에서 사용되어온 많은 원자로 설계코드들이 적용가능한지에 대한 검증을 요구하고 있으며, 만일 적용가능하지 않다면, 기존 코드를 수정하거나, 새롭게 코드를 재개발하는 연구수행을 필요로 한다. 본 연구에서는 기존의 발전용 PWR 및 SMART에도 모두 범용으로 적용 가능하도록, 정상 운전시 냉각재내 비방사능을 평가할 수 있는 전산코드를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

## 2. 1차 냉각재내 핵분열 생성물 비방사능 평가 방법론

### (1) 수학적 모형

원자로 냉각재내 핵종농도를 결정하는데 사용되는 수학적 모형은 냉각재 영역과 핵연료 펠렛 영역에 대해서 핵분열 생성물의 생성과 제거의 질량평형을 적용하여 얻을 수 있다. 핵연료 펠렛 영역에서의 질량평형은 핵분열에 의해 직접 생성되는 핵분열생성물, 선행핵종의 붕괴, 중성자에 의한 방사화 등에 의한 생성과 방사성 붕괴, 중성자에 의한 방사화, 원자로 냉각재로의 누설 등에 의한 제거로 이루어진다. 원자로 냉각재 영역에서의 생성은 손상된 핵연료 피복재를 통해 핵연료로부터 누출되는 핵분열 생성물, 냉각재내의 선행핵종의 붕괴, 냉각재와 부식생성물의 중성자에 의한 방사화를 포함하며, 제거에는 방사성 붕괴, 냉각재의 정화, 핵연료 연소에 따른 붕소농도 조절을 위한 주입 및 방출운전, 누설과 부하추중운전 및 발전소의 기동과 정지와 같은 또 다른 주입 및 방출 운전 등이 있다. 이러한 생성과 제거를 고려하여 결정되는 수학적 지배방정식은 다음과 같은 선형 1차 연립미분방정식으로 이루어진다.

○ 핵연료 펠렛 영역내 핵분열 생성물에 대한 지배방정식

$$\frac{dN_{p,i}}{dt} = FY_iP + \sum_{j=1}^{i-1} f_{i-1} \lambda_{i-1} N_{p,i-1} + \sum_j \sigma_j \phi N_{p,j} - (\lambda_i + D\nu + \sigma_i \phi) N_{p,i} \quad (1)$$

각각의 변수들은 다음과 같이 정의된다.

N : 원자수, atoms

F : 평균핵분열률, fission/MWt-sec

Y : 핵종의 노심평균 핵분열생성수율

P : 노심출력, MWt

$\lambda$  : 붕괴상수,  $\text{sec}^{-1}$   
 $\sigma$  : 미시 포획단면적,  $\text{cm}^2$   
 $\Phi$  : 열중성자속,  $\text{n/cm}^2\text{-sec}$   
 $\nu$  : 누설율 계수,  $\text{sec}^{-1}$   
 $f$  : 분기율, fraction  
 $t$  : 시간,  $\text{sec}$   
 $D$  : 핵연료 피복재의 손상비율, fraction

식(1)에서 사용한 첨자는 다음과 같이 정의된다.

$i$  :  $i$ 번째 핵종  
 $i-1$  : 붕괴(decay chain)에 있어서  $i$ 번째 핵종의 선행핵종  
 $j$  : 중성자 방사화에 있어  $i$ 번째 핵종의 선행핵종  
 $P$  : 펠릿 영역

○ 원자로 냉각재 영역내의 핵분열생성물에 대한 지배방정식

$$\begin{aligned}
 \frac{dN_{c,i}}{dt} = & D_i N_{p,i} + f_{i-1} \lambda_{i-1} N_{c,i-1} + \sigma_i \phi \cdot \text{CVR} \cdot N_{c,j} \\
 & - \left( \lambda_i + \frac{Q}{\text{WP}} \eta_i + \frac{(1-\eta_i)C}{C_0 - Ct} + \frac{L}{\text{WP}} + \sigma_i \phi \cdot \text{CVR} \right) N_{c,i}
 \end{aligned} \quad (2)$$

각각의 변수들은 다음과 같이 정의된다.

$\text{CVR}$  : 원자로냉각재에 대한 노심내 냉각재의 붕괴 비율, fraction  
 $Q$  : 출력운전중의 화학 및 체적제어계통의 정화유량,  $\text{lbm/sec}$   
 $\text{WP}$  : 출력운전중의 원자로냉각재계통내의 냉각재질량,  $\text{lbm(kg)}$   
 $\eta$  : 화학 및 체적제어계통 이온교환기의 수지 효율과 탈기장치의 효율  
 $C_0$  : 주기초 붕소 농도,  $\text{ppm}$   
 $L$  : 원자로냉각재로부터 누설과 그 이외의 주입 및 방출  
 $\dot{C}$  : 주입 및 방출로 인한 붕소 농도 감소율,  $\text{ppm/sec}$

식(2)에서 사용한 첨자는 다음과 같이 정의된다.

$C$  : 냉각재 영역

(2) NUREG-0017 방법론

NUREG-0017<sup>2</sup>은 정상운전시 냉각재 방사선원항을 계산하여 환경으로 유출되는 방사성 물질의 양을 계산하는 방법에 대한 보고서로서, 이 방법론에 따라 구현된 코드로 PWR-GALE<sup>2</sup> 코드가 있다. 여기에서는 ANSI Standard N-237<sup>3</sup>의 방법을 적용하여 정상운전시 원자로 냉각재내의 방사능 농도를 예측한다. 발전소의 실제운전자료를 표준발전소와 비교하여 계산한 보정 인자를 냉각재의 표준농도에 곱하여 핵종농도를 구하는 것이다. 표준 핵종농도는 미국의 가압경수로 발전소에서 측정된 냉각재 비방사능을 종합적으로 평가하여 산출된 대표 값이다. 이 때문에, 표준발전소의 열출력 범위 및 냉각재 정화 조건을 많이 벗어나는 SMART와 같은 원자로에는 PWR-GALE 코드를 적용할 수가 없다.

보정인자에 관한 수식은 NUREG-0017에서는 냉각재 방사능 농도가 정상상태를 이룬다는 가정에 기초하여 얻을 수 있다. 정상상태를 가정하면, 식(2)의 좌변이 무시할 정도로 작아지므로, 냉각재 농도에 관한 간단한 수식이 구해진다. 실제발전소에 대한 수식과 표준발전소에 대한 수식을 서로 나누어서 얻게 되는 비율이 바로 보정인자가 된다. 기존의 발전용 원자로에서는 운전중에도 냉각재 정화를 수행하기 때문에 방사능 농도가 정상상태를 유지할 수 있다. 그러나, 운전중에는 냉각재 정화를 수행하지 않는 SMART와 같은 새로운 원자로에서도 방사능 농도가 정상상태를 이룬다고 단정하기에는 무리가 있다. 반감기가 짧은 핵종들은 대부분 정상상태를 이룰 수 있지만, 나머지 핵종들은 그렇지 않을 확률이 크기 때문이다.

### (3) DAMSAM 코드

DAMSAM<sup>4</sup> 코드는 ABB/CE에서 1차 냉각재 및 2차 냉각재의 방사능 농도를 계산하기 위해 제작하였다. 방사능 농도는 PWR-GALE에서 사용하는 정상상태 가정을 사용하지 않고, 식(1)과 식(2)처럼 미분방정식을 수치해석으로 해를 구하여 계산한다. DAMSAM에서는 다음과 같은 8개 영역에 대하여 적절한 지배방정식을 구성하고, 유한 차분법으로 8개의 1차 연립방정식을 만들어서, 시간에 따른 방사능 농도를 계산한다: Fuel Pellet Region, Primary Coolant Region, Steam Generator Region(Unit 1 & 2), Steam Dump Region(Unit 1 & 2), Condenser Hotwell Region, Air Ejector Region.

붕괴사슬(decay chain) 처리를 쉽게 하기 위하여, 핵종별 라이브러리가 붕괴사슬에 맞추어서 순차적으로 구성되어 있으며, 붕괴사슬의 처음 고리에 해당하는 선행 핵종부터, 각 시간단위마다 8개의 1차 연립방정식의 해를 계산한다. 그러면, 붕괴사슬 다음에 해당하는 핵종의 입장에서 선행 핵종의 방사능 농도가 미리 고정된 상수로서 나타나고, 이 선행 핵종들의 영향을 모두 합산하면 된다.

그러나, DAMSAM 코드는 CE형 원자로에 최적화 되어있기 때문에, 내장된 핵종별 라이브러리를 다른 원자로에 활용하기가 곤란하며, DAMSAM 코드 방법론에 맞는 범용의 라이브러리를 새롭게 구축하기 어려운 단점이 있다.

## 3. SAEP(Specific Activity Evaluation Program) 코드의 개발

## (1) 코드의 개발방향

기존의 발전용 PWR 및 새로운 개념의 중소형 일체형 원자로인 SMART에도 모두 적용 가능한 범용의 코드를 만들기 위해서는, 식(1)과 식(2)와 같은 지배 방정식들을 PWR-GALE 코드처럼 정상상태를 가정하는 단순화 작업에 의존하지 않고, 수치 해석으로 해를 직접 구할 수 있어야 하며, DAMSAM 코드처럼 특정 원자로에만 사용 가능한 라이브러리보다는, 많은 종류의 원자로를 포함하거나 그에 적합한 라이브러리들을 갖추어야 한다.

ORIGEN2<sup>5</sup>코드는 방사성 동위원소 생성과 소멸을 처리하는 코드로서, 현재 원자력분야에서 노심내 방사능 재고량 평가, 재처리 등 다양한 목적으로 널리 사용되면서 그 효용성을 인정받고 있으며, 대부분의 기존 상업로에 적용 가능한 많은 종류의 라이브러리를 갖추고 있다. 본 연구에 필요한 냉각재 방사능 농도 계산에 관한 핵종별 자료를 새롭게 구축하기보다는, ORIGEN2 코드의 라이브러리에 근거하여 대상원자로에 가장 적합한 라이브러리를 선정하여 우선 활용하고, 필요하다면 차후에 새로운 라이브러리를 개발하는 방향으로 연구를 추진한다.

냉각재 방사능 농도계산을 위한 지배방정식들을 수치해석적으로 풀기 위하여, 일반적인 수치해석방법을 사용할 수 있다. 미분방정식을 유한차분법으로 모사한 후에, 이 1차 연립방정식에 관한 행렬식을 반복계산법을 이용하여 해를 구하는 것이다. 그러나, ORIGEN2 코드의 라이브러리를 사용한다면, 행렬의 크기가  $1696 \times 1696$ 에 이르는 대형 행렬이 되고, 반감기가 짧은 동위원소와 반감기가 긴 동위원소의 시간차이가 매우 크기 때문에 수치해석적으로 다루기 어려운 Stiff Matrix가 된다. 핵분열 생성물에 관한 농도계산으로 한정하여 행렬의 크기를  $688 \times 688$ 로 줄이고, Stiff Matrix를 풀 수 있는 알고리즘을 적용하여 실제로 계산해보니, PIII 450 PC 시스템으로 30일정도를 계산하는데 1시간정도 소요되는 등 계산시간이 매우 길고, 모사기간이 길어질수록 정확도가 떨어지는 등 많은 문제점이 노출되었다. 더구나, 정확도가 떨어지는 현상을 해결하기 위해서는 계산시간간격을 더 줄여야 하는데, 이를 위해서는 더 많은 계산시간이 필요하기 때문에 현재의 PC 시스템으로는 일반적인 수치해석방법을 현실적으로 적용할 수가 없다는 것을 확인했다.

ORIGEN2 코드는 식(3)과 같은 지배방정식을 사용하여 노심내 재고량을 계산한다. 식(3)은 핵변환 및 방사성 붕괴에 의하여 핵종이 생성되거나 소멸하는 것을 나타내는 일반적인 표현이며, 식(1)을 대신할 수 있다. 식(3)에 노심에서 냉각재로 누설되는 새로운 생성 항을 추가하고, 냉각재 정화에 의하여 핵종이 제거되는 정확율을 소멸 항에 삽입한 식(4)는 식(2)를 대신할 수 있는 지배방정식이 될 수 있다. ORIGEN2 코드를 수정하여 식(4)를 풀 수 있는 코드로 변환한다면, 냉각재 내 방사능 계산을 단순화하는 가정 없이 수행할 수 있는 코드를 만들 수 있다.

## (2) 냉각재내 방사능 계산을 위한 지배방정식 정의

ORIGEN2 코드에서 핵변환 및 방사성 붕괴에 의하여 핵종이 생성되거나 소멸하는 것을 나타내는 일반적인 지배방정식으로 다음과 같은 식(3)을 사용한다.

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{ij}\lambda_j X_j + \bar{\phi} \sum_{k=1}^N f_{ik}\sigma_k X_k - (\lambda_i + \bar{\sigma}_i)X_i \quad (i=1,\dots,N) \quad (3)$$

각 변수들은 다음과 같이 정의된다.

- $X_i$  : 핵종  $i$ 의 원자밀도(atom density)
- $\lambda_i$  : 핵종  $i$ 의 붕괴상수
- $\sigma_i$  : 핵종  $i$ 의 중성자 흡수 단면적
- $l_{ij}, f_{ik}$  : 분기율(branching fraction)
- $\bar{\phi}$  : 위치와 에너지 적분된 유효, 일군 중성자속

식(3)을 냉각재내 방사능 계산을 처리할 수 있도록 확장하기 위하여, 앞서 언급한 대로, 노심에서 냉각재로 누설되는 새로운 생성 항을 추가하고, 냉각재 정확에 의하여 핵종이 제거되는 정확율을 소멸 항에 삽입하면 식(4)와 같은 비균질(Inhomogeneous) 미분방정식이 된다.

$$\frac{dX_i}{dt} = PF_i + \sum_{j=1}^N l_{ij}\lambda_j X_j + \bar{\phi} \sum_{k=1}^N f_{ik}\sigma_k X_k - (\lambda_i + \bar{\sigma}_i + R_i)X_i \quad (4)$$

여기서,  $PF_i$ 는 핵종  $i$ 가 노심에서 냉각재로 누설되는 생성항(atom density/sec)이며,  $R_i$ 는 핵종  $i$ 가 냉각재내 정확설비에 의하여 제거되는 정확율(vol/sec)이다.

(3) 비균질(Inhomogeneous) 방정식 계산 처리 모듈(O2P 모듈)

식(4)를 ORIGEN2 코드를 이용하여 해를 구하기 위해서는 서브루틴 수정작업이 필요하다. ORIGEN2코드에서는 기본적으로 식(3)과 같은 균질(Homogeneous) 방정식을 풀고 있지만, 지속적인 Feedup와 Removal이 필요한 재처리 경우를 처리할 수 있도록 식(4)와 유사한 비균질 방정식을 풀 수도 있다.

다음과 같은 부프로그램을 ORIGEN2 코드에 추가한다.

```

subroutine setdnb(ITOT, D, B)
  dimension B(1), D(1)
  OPEN(UNIT=60, FILE='fpnclean.dat', STATUS='unknown')
  DO 200 I=1, ITOT
    READ (60, 100) FPR, CLEAN
100  FORMAT(32X, E11.4, E11.4)
    D(I) = D(I) - CLEAN
    B(I) = FPR
200  continue
  return
end

```

위 서브루틴을 ORIGEN2 코드의 Main3() 부프로그램에서 다음과 같은 위치에 연결하여 실행되도록 한다.

```
CALL FLUXO(DELT, OLDFLX, M, TSEC, A, LOC, B, D, NONO, KD, LONG, MAI 6640
*   NUCL, TOCAP, XPAR, XTEMP, AP, IOUT, FISS, DIS, NFUDFP, IFD, MAI 6650
*   MIRR, FPRATN, IJKO, IFIRST) MAI 6660
CALL SETDNB(ITOT, D, B)
CALL DECAY(DELT, A, D, LOC, NONO, KD, LONG, XP, XPAR, XTEMP, NQ, MAI 6670
*   XNEW, MX, IOUT, NUCL) MAI 6680
CALL TERM(TMB, A, B, D, LOC, NONO, KD, NONP, LOCP, NQ, LONG, MAI 6690
*   CIMN, CSUM, XPAR, XP, XTEMP, AP, XNEW, MX, IOUT, LOCA, MAI 6700
*   IAPMAX, NUCL) MAI 6710
CALL EQUIL(A, LOC, B, D, NONO, KD, LONG, XP, XPAR, XTEMP, XNEW, MAI 6720
*   MX, IOUT, NUCL)
```

이때, 추가적인 입력파일로서, 새로운 냉각재 생성 항  $PF_i$ 와 정확율  $R_i$ 를 저장한 파일(ex. fpclean.dat)을 필요로 한다. 이러한 수정작업을 통하여 완성된 코드는 식(4)와 같은 비균질 방정식의 해를 구할 수 있으며, 본 연구에서는 냉각재 방사능 계산을 위한 부프로그램(이하 O2P: ORIGEN2 Patched 모듈)으로 활용한다.

#### (4) 1차 냉각재내 핵분열 생성물 방사능 평가 방법론 개발

ORIGEN2 코드를 수정하여 비균질 방정식을 처리할 수 있도록 만든 부프로그램 O2P 모듈을 이용하여, 1차 냉각재내 핵분열 생성물 방사능을 계산할 수 있는 방법론을 개발하려 한다. 노심내 방사선원항을 ORIGEN2 코드로 계산한 후에, 여기에 핵연료 손상율(ex. 설계기준방사선원항에 대해서는 1%)과 각 핵종에 대한 누설율을 곱한 후에, 정확율과 함께 입력자료로 만들고 비균질 방정식 처리모듈 O2P를 실행하면 그 결과로 1차 냉각재내 핵분열 생성물의 방사능을 계산할 수 있게 된다. 단위시간에 대하여, 1차 냉각재로의 누설량  $PF_i$ 가 일정하다고 가정하고, 모사시간을 짧은 시간단위로 쪼갠다면, 시간에 따른 방사능 농도도 얻을 수 있다. 1차 냉각계통에서 2차 냉각계통으로 누설되는 양을 계산하고, 위와 같은 방법으로 O2P를 반복 실행하면, 2차 냉각재의 방사능 양도 계산할 수 있다. 그러나, 최종적인 목표인 환경으로 누출되는 방사능 양을 계산하기 위해서는 2차 계통에 있는 여러 설비와 기기들의 상호작용을 고려해야 하기 때문에, 2차 계통이후에 대한 방사능 평가 방법론 개발은 다음단계 연구기간에 수행될 예정이다.

비균질 방정식 처리모듈 O2P를 활용한 본 연구 방법론을 구현한 전산코드 SAEP(Specific Activity Evaluation Program)의 알고리즘은 다음과 같으며, 1차 냉각재내 핵분열생성물 방사능 평가를 수행한다.

#### ○ 입력파일 준비

: ORIGEN2 코드를 위한 입력파일 자동양식 작성

- : Burnup 시나리오 파일 작성
- : O2P 모듈을 위한 입력파일 자동양식 작성

① 초기화

- : ORIGEN2 라이브러리의 붕괴상수 및 흡수 단면적 저장
- : 정화율 계산, 핵연료 손상을 설정 및 누설을 저장

② 현재시간  $t$ 에 대하여 노심내 핵분열 생성물 재고량 계산

- : 시간구간  $[t-\Delta t, t]$ 에 대한 ORIGEN2 코드용 입력파일 자동생성
- : ORIGEN2 코드 자동실행

③ 1차 냉각재로의 누설량  $P_{Fi}$  계산

- : ORIGEN2 코드의 Punched Output 파일을 읽어서 노심내 재고량 저장
- : 읽어들이는 노심내 재고량에 핵연료 손상을 및 각 핵종에 대한 누설율을 곱함
- : 정화율과 누설량을 O2P 모듈을 위한 입력자료로 저장

④ 비균질 방정식 처리모듈 O2P 실행

- : 이전시간  $[t-\Delta t]$ 에서의 1차 냉각재내 핵종별 재고량을 Punched Input 파일로 저장
- : 시간구간  $[t-\Delta t, t]$ 에 대한 O2P 모듈용 입력파일 자동생성
- : O2P 모듈 자동실행

⑤ 1차 냉각재 방사능 양 계산

- : O2P 모듈의 Punched Output 파일을 읽음
- : 시간  $t$ 에서의 1차 냉각재내 핵종별 재고량 저장
- : 환산인자를 곱하여 냉각재 방사능으로 변환후 출력

⑥ 다음 시간단계  $[t+\Delta t]$ 로 진행

#### 4. 1차 냉각재 비방사능 계산 결과 및 분석

SAEP을 이용하여 계산한 1차 냉각재내 주요 핵분열생성물의 방사능은 표1부터 3과 같다. NUREG-0017에 나와있는 표준발전소의 표준핵종 농도와 울진 3,4호기의 FSAR<sup>6</sup>자료를 비교자료로 수록하였다. SAEP에 의하여 울진3,4호기의 293일과 1023일에 대한 방사능 농도를 계산하였다. 293일은 핵연료를 293일 동안 연소시킨 경우를 의미하고, 1023일은 핵연료를 293일동안 연소시키고, 72일간 유지보수, 293일 연소, 72일간 유지보수, 293일 연소하는 운전시나리오를 따르는 계산 결과이다. 두 개의 결과를 비교해보면, 대다수의 핵종이 1023일일 때 비방사능이 다소 작아진 것을 볼 수 있다. 이들은 대부분 반감기가 짧은 핵종들인데, 운전중에 방사능 농도가 포화상태를 유지하다가, 유지 보수하는 72일간에 붕괴되어 거의 사라지는 핵종들로서, 연소도가 증가함에 따라 선행핵종들의 수밀도가 감소되어 마지막 주기에서는 처음 주기보다 생성되는 양이 적기 때문에 생기는 현상이다. 반대로, 증가하는 경우를 볼 수 있는데, 이는 대부분 반감기가 긴 핵종들로서, 시간이 지날수록 냉각재에 지속적으로 축적이 되기 때문에 증가하는 것이다. 그리고, 울진3,4호기의 FSAR자료와 비교하여 보면 전체적인 경향은 Order of Magnitude 관점에서 일치하는 모습을 보이고 있으며, 이러한 현상들은 SAEP가 냉각재 계산을 제대로 수행하고 있음을 보여주는 근거가 될 수 있다.



기존의 방사능 평가 코드로는 계산할 수 없었던 SMART에 대한 방사능을 계산하였다. SMART는 운전중에는 정확도를 하지 않는다는 가정을 적용하여 EFPD 990일을 한 개의 시간구간으로 설정하여 계산하였다. 또한, 100일씩 나누어서 10개의 시간구간으로 설정하여 그 결과를 비교해 보았다. 단위시간간격에 대해서는 1차냉각재로의 누설량이 일정하다고 가정하고 있으므로, 시간간격을 짧게 할수록 계산결과가 정확해질 것으로 생각되며, 10개의 시간구간으로 나누었을 때 대부분의 핵종 방사능이 약간씩 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 1차 냉각재로의 누설량이 시간에 따라 조금씩 변하는 현상을 반영하기 때문이며, 원리적으로는 더 정확한 값이 될 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 발전용 PWR 뿐만 아니라, SMART와 같은 새로운 개념의 원자로에도 적용 가능한 범용의 냉각재 방사능 평가코드를 개발하는 것이 목표이다. 이를 위하여, 기존에 개발된 방사능 냉각재 평가 코드의 문제점이 무엇인지 검토하고, 이러한 문제점을 반영할 수 있도록 연구방향을 설정하였다. PWR-GALE 코드 방법론의 기본가정인 정상상태 가정을 사용하지 않고, DAMSAM 코드와 같이 미분방정식의 지배방정식을 풀 수 있어야 하고, DAMSAM 코드처럼 특정한 원자로에만 최적화되지 않도록 핵종자료에 관한 라이브러리가 일반적으로 용인되는 것이어야 한다. 이러한 점을 고려하여, ORIGEN2 코드를 적절하게 수정하여 냉각재 방사능을 계산하는 비균질 지배방정식의 해를 구할 수 있는 부프로그램 형태로 모듈화하고, 이를 불러들여서 활용하는 방법론 및 전산코드 SAEP를 개발하였다. SAEP의 정확성 및 효율성을 벤치마킹하기 위해, 울진3,4호기에 대한 핵분열생성물 방사능 농도를 계산하여 기존의 계산결과와 비교하였고, 전체적으로 일치하는 경향을 보였으며, 시간에 따른 변화도 제대로 반영하였다. 기존의 발전용 원자로와 설계특성 및 운전특성이 매우 달라서 기존의 방사능 평가 코드를 활용하기가 곤란했던, SMART에 대해서도 본 연구에서는 1차 냉각재에 대한 핵분열생성물의 방사능 농도를 제시하였다. 본 연구에서 개발된 냉각재 방사능 평가코드 SAEP는 기존 원자로뿐만 아니라, 새로운 개념의 신형원자로에도 널리 활용 가능하며, 신뢰성 있는 계산결과를 제시할 수 있다고 사료된다. 향후에는, 1차 냉각재의 비방사능 평가와 함께 2차 냉각재의 비방사능과 환경 방출 방사선/능을 평가할 수 있는 방법론을 정립하고 이를 이용한 전산 코드를 개발할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

1. J. K. Seo et al., "Advanced Integral Reactor(SMART) for Nuclear Desalination, "IAEA-SM-347/40, Proceedings of Symposium on Desalination of Seawater with Nuclear Energy, Taejon, Korea, May 1997.
2. U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors(PWR-GALE Code)," NUREG-0017, April 1976.
3. ANSI/ANS-18.1-1984, "American National Standard-Radiation Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors," American Nuclear Society, 1984.
4. P. D. Maloney, "DAMSAM-A Digital Computer Program to Calculate Primary and Secondary Activity Transients," Combustion Engineering, Inc., 1978.
5. RSICC, "ORIGEN2.1 : Istop e Generation and Depletion Code - Matrix Exponential Method," CCC-371, Radiation Safety Information Computational Center, Oak Ridge National Laboratory, 1991.
6. 한국전력공사, "울진 원자력 3,4호기 안전성분석보고서," Ch.11.

표 1. 불활성 기체에 대한 1차 냉각재내 핵분열 생성물 비방사능[ $\mu\text{Ci/g}$ ]

Noble Gases	NUREG-0017	UCN3,4	UCN3,4	UCN3,4	SMART	SMART
	refer. Plant	FSAR	293day(1cycle)	1023day(3cy)	no purification	10 stage
KR-085m	1.600E-01	7.700E-01	1.961E+00	1.342E+00	8.692E-01	8.388E-01
KR-085	4.300E-01	6.100E-01	2.110E-02	8.323E-02	2.330E+00	1.155E+00
KR-087	1.500E-01	8.000E-01	1.105E+00	7.249E-01	4.709E-01	4.610E-01
KR-088	2.800E-01	1.900E+00	3.453E+00	2.249E+00	1.392E+00	1.393E+00
XE-131m	7.300E-01	8.300E-01	1.926E+00	1.885E+00	2.063E+00	2.065E+00
XE-133m	7.000E-02	7.500E-02	3.672E+00	3.477E+00	2.019E+00	2.009E+00
XE-133	2.600E+00	2.100E+01	2.167E+02	1.984E+02	1.453E+02	1.449E+02
XE-135m	1.300E-01	6.500E-01	4.555E-01	4.293E-01	3.016E-01	3.005E-01
XE-135	8.500E-01	3.100E+00	5.757E+00	4.802E+00	5.282E+00	5.071E+00
XE-137	3.400E-02	1.500E-01	1.685E-01	1.574E-01	2.938E-01	1.964E-01
XE-138	1.200E-01	5.500E-01	5.959E-01	5.118E-01	2.608E-01	2.630E-01

표 2. 할로겐원소에 대한 1차 냉각재내 핵분열 생성물 비방사능 [ $\mu\text{Ci/g}$ ]

Halogens	NUREG-0017	UCN3,4	UCN3,4	UCN3,4	SMART	SMART
	refer. Plant	FSAR	293day(1cycle)	1023day(3cy)	no purification	10 stage
BR-084	1.600E-02	2.200E-02	3.599E-02	2.518E-02	1.697E-02	1.744E-02
I-131	4.500E-02	2.100E+00	2.194E+00	2.143E+00	2.214E+01	2.215E+01
I-132	2.100E-01	6.700E-01	9.211E-01	8.860E-01	1.421E+00	1.422E+00
I-133	1.400E-01	3.300E+00	3.284E+00	3.002E+00	4.783E+00	4.784E+00
I-134	3.400E-01	4.600E-01	4.987E-01	4.397E-01	2.457E-01	2.481E-01
I-135	2.600E-01	2.000E+00	2.041E+00	1.883E+00	1.545E+00	1.547E+00
<b>Cs, Rb</b>						
RB-088	1.900E-01	2.000E+00	3.463E+00	2.256E+00	1.477E+00	1.454E+00
CS-134	7.100E-03	1.800E-01	8.975E-02	6.235E-01	1.484E+02	6.969E+01
CS-136	8.700E-04	4.000E-02	8.245E-02	1.879E-01	3.231E+00	2.461E+00
CS-137	9.400E-03	2.600E-01	1.673E-01	4.775E-01	2.519E+02	1.374E+02

표 3. 나머지 핵종에 대한 1차 냉각재내 핵분열 생성물 비방사능[ $\mu\text{Ci/g}$ ]

Others	NUREG-0017	UCN3,4	UCN3,4	UCN3,4	SMART	SMART
	refer. Plant	FSAR	293day(1cycle)	1023day(3cy)	no purification.	10 stage
SR-089	1.400E-04	2.700E-03	3.340E-03	2.156E-03	1.908E-01	1.954E-01
SR-090	1.200E-05	1.000E-04	5.656E-05	1.322E-04	1.553E-01	8.964E-02
SR-091	9.600E-04	4.700E-03	5.626E-03	3.711E-03	1.420E-02	1.697E-02
Y-091m	4.600E-04	2.700E-03	2.996E-03	1.977E-03	8.248E-03	9.853E-03
Y-091	5.200E-06	3.900E-04	2.001E-04	1.378E-04	1.775E-02	1.880E-02
Y-093	4.200E-03	4.000E-03	5.092E-04	3.743E-04	1.185E-02	1.464E-02
ZR-095	3.900E-04	4.200E-04	5.364E-04	4.491E-04	5.180E-02	5.359E-02
NB-095	2.800E-04	4.100E-04	5.202E-04	4.480E-04	7.304E-02	7.460E-02
MO-099	6.400E-03	2.500E-01	6.125E-01	5.638E-01	2.674E+00	2.506E+00
TC-099m	4.700E-03	1.300E-01	3.146E-01	2.896E-01	2.341E+00	2.194E+00
RU-103	7.500E-03	6.400E-03	4.055E-04	4.819E-04	3.035E-02	2.972E-02
RU-106	9.000E-02	7.700E-02	5.359E-05	1.714E-04	5.338E-02	3.584E-02
AG-110m	1.300E-03	*	3.228E-11	2.876E-10	3.772E-08	2.213E-08
TE-129m	1.900E-04	5.100E-03	8.014E-03	8.863E-03	3.303E-01	3.297E-01
TE-129	2.400E-02	2.500E-02	5.927E-03	6.452E-03	6.290E-03	5.606E-03
TE-131m	1.500E-03	2.600E-02	2.004E-02	2.062E-02	3.942E-02	3.945E-02
TE-131	7.700E-03	1.100E-02	7.345E-03	7.123E-03	1.047E-02	1.050E-02
TE-132	1.700E-03	1.700E-01	2.374E-01	2.274E-01	1.027E+00	1.028E+00
BA-137m	**	2.500E-01	1.575E-01	4.495E-01	2.383E+02	1.299E+02
BA-140	1.300E-02	1.100E-02	3.680E-03	3.225E-03	6.930E-02	7.120E-02
LA-140	2.500E-02	2.200E-02	1.099E-03	9.760E-04	7.065E-02	7.253E-02
CE-141	1.500E-04	1.300E-04	5.441E-04	4.756E-04	3.295E-02	3.444E-02
CE-143	2.800E-03	2.500E-03	4.081E-04	3.392E-04	1.213E-02	1.436E-02
CE-144	3.900E-03	3.400E-03	2.454E-04	3.316E-04	1.436E-01	1.293E-01

\* 울진3,4호기 FSAR 자료(표 11.1-2)에 수록되어 있지 않음

\*\* NUREG-0017/rev.1 보고서(Table 2-2)에 수록되어 있지 않음