

## 고리 1호기 원자로 압력용기의 방사화 선원항 평가

### A Study on Source Term Assessment of the Kori Unit 1 Pressure Vessel

신상화\*, 박광현\*, 황주호\*, 제무성\*\*, 정찬우\*\*\*

\*경희대학교(경기도 용인시 기흥읍 서천 1리)

\*\*한성대학교(서울시 성북구 삼선동2가)

\*\*\*한국원자력안전기술원(대전광역시 유성구 구성동)

#### 요 약

고리 1호기의 압력용기를 대상으로 방사선원항 평가체계를 구축하고, 계산에 의한 방법으로 방사선원항을 평가하였다. 방사선원항 평가체계로는 MCNP/ ORIGEN-2 체계를 구축하였으며 이의 타당성을 확인하였다. 이 체계를 이용하여 중성자속을 계산한 결과 중성자속이 가장 높은 지점에서 약  $6.09 \times 10^{11}$  #/cm<sup>2</sup> sec 정도의 값을 나타내고 있으며, 방사능양은 폐로 예정 시점인 2008년을 기준으로 계산한 결과 약  $1.98 \times 10^{13}$  Bq/t 정도의 값을 나타내고 있다. 냉각시간에 따른 방사능에 있어서는 약 10년까지는 Fe-55 및 Ni-63이 대부분을 차지하며, 10년 이후에는 Ni-59 및 Ni-63이 핵종이 대부분을 차지하는 것으로 평가되었다. 또한, 약 50년 이상 냉각 후의 총 방사능양은 원자로 정지 시점과 비교하여 약 0.3% 이하로 감소하는 것으로 평가되었다.

#### Abstract

From this research which it is seen evaluation objective structural material with Kori Unit 1 pressure vessel radiation source term, it is constructed the evaluation system in the object, a radiation source clause with the method due to a calculation it evaluated. With the radiation crew clause evaluation system it is confirmed the different meaning propriety to construct the MCNP/ORIGEN-2 system. It is used this system and the most high price of neutron flux degree point is shown the price about  $6.09 \times 10^{11}$  #/cm<sup>2</sup> sec, the amount of activity is shown the price about  $1.98 \times 10^{13}$  Bq/t by the result which calculates in standard, the estimated decommissioning point of time in 2008. According to the cooling time, for the radioactivity which it is followed Fe-55 and Ni-63 take for the most part about 10 years. There are evaluated that Ni-59 and Ni-63 hold on the whole part of nuclide hold after 10 years. Also, it is evaluated that cooling kind total activity compared the atomic reactor stationary point of view and it is diminished below 0.3% for more than 50 years.

## I. 서론

원자로가 가동됨에 따라 중성자 조사로 인하여 압력용기를 포함한 구조재는 점차 방사화되어 해체 작업시에는 작업자에게 방사선 피폭을 일으키는 주요 선원항이 된다. 원자력 시설 해체에 관한 안전성 분석에 필수적으로 요구되는 것이 이 선원항이다<sup>[1]</sup>. 본 연구에서는 선원항 평가 구조재로 압력용기를 설정하였으며, 대상 원전으로는 가동기간이 가장 길고 가장 노후화 되어 2008년경에 폐로 예정인 고리 1호기를 선택하였다. 압력용기에 대한 선원항 평가 방법은 직접 시료 채취를 하는 방법과 계산에 의한 방법이 있으나<sup>[1]</sup>, 본 연구에서는 계산에 의한 방법을 모색하고자 한다. 해체 시 압력용기의 선원항 평가에 대한 외국의 사례를 살펴보면 일본의 JPDR<sup>[2]</sup>, 미국의 TROJAN, 핀란드의 TVO 원자로 모두 ANISN 이나 DORT 계산 코드를 사용하였다. 하지만 ANISN, DORT와 같이 각분할법을 이용하는 코드는 비확률적 모델링의 한계와 핵단면적과 선원항의 균정수화 등에서 발생하는 코드 고유의 불확실성을 포함하고 있어 최근 들어 기존 계산방법의 개선이 제기되고 있고 있다<sup>[3]</sup>. 미국의 Yankee Rowe 원자로가 MCNP/ORIGEN 계산체계를 이용하여 선원항 평가를 수행한 것은 그 한 예라고 할 수 있다<sup>[4]</sup>. 이에 본 연구에서도 MCNP/ORIGEN 계산 체계를 고리1호기 원자로 압력용기에 적용하고자 한다. 우선, 압력용기의 선원항에 중요한 기여를 하는 핵종을 선택하고 이 핵종의 생성과정을 분석하였다. 그리고 중성자 조사에 따른 중요 기여 핵종의 선원 변화를 MCNP 코드<sup>[5]</sup>와 ORIGEN-2 코드<sup>[6]</sup>로 구하는 체계를 구축하였다. 또한, 이 체계를 바탕으로 고리 1호기 1주기 노심에 대한 중성자속 분포 및 방사화 중성자 포획 반응단면적( $n, \gamma$ )을 산출하고 선원항을 평가하였다. 또한 고리1호기의 수명을 30년으로 가정하여 2008년경부터 원자로가 정지한다고 가정하고 냉각시간에 따른 방사능을 계산하여 냉각시간별로 총 방사능에 가장 크게 기여하는 핵종이 어떤 핵종이며 총 방사능 양은 얼마인지를 평가하고자 하였다.

## II. 선원항 평가체계

압력용기의 선원항 평가는 압력용기가 원자로 가동기간 동안 얼마만큼 방사화되었는 지에 대한 정량평가를 수행하는 것이다. 따라서 정량 평가를 하기 위해선 방사성 핵종의 종류와 그 방사능(radioactivity) 양(quantity)을 계산해야 하는데 일반적으로 핵종의 연소이력에 대한 평가 코드로는 ORIGEN-S와 ORIGEN-2를 널리 사용하고 있다. 그러나 이러한 코드는 모두 핵연료가 밀집되어 있는 노심 해석용이므로 모든 반응 단면적의 라이브러리가 노심 위주의 중성자 스펙트럼에 의해 계산된 것이다. 그러나 압력용기는 노심과 많이 떨어져 있어서 중성자 스펙트럼이 노심 영역과 다르다.

이 영역에서는 핵분열에 의한 중성자 생성은 없으며, 속중성자는 대부분 열중성자화되어 들어오는 특성을 지닌다. 따라서, 대부분 중성자의 에너지는 낮아지게 되어 중성자 스펙트럼은 저에너지 영역으로 치우치게 된다.

그림 1에서 보여지듯이  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$  반응 단면적은 중성자의 에너지가 감소함에 따라 증가함을 볼 수 있다. 따라서, 압력용기 영역에서의 단일 그룹 반응 단면적은 노심 영역의 값보다 증가되어야 한다. 이러한 변화율은  $1/v$  흡수물질에서는 반드시 고려되어야 한다<sup>[1]</sup>.

따라서, 본 연구에서는 중성자 스펙트럼을 적용하여 이를 바탕으로 반응단면적을 생성하고, 이 값을 ORIGEN 코드에 적용시켜 압력용기의 조사에 따른 핵종 분석을 수행하는 체계를 구축하고자 한다.

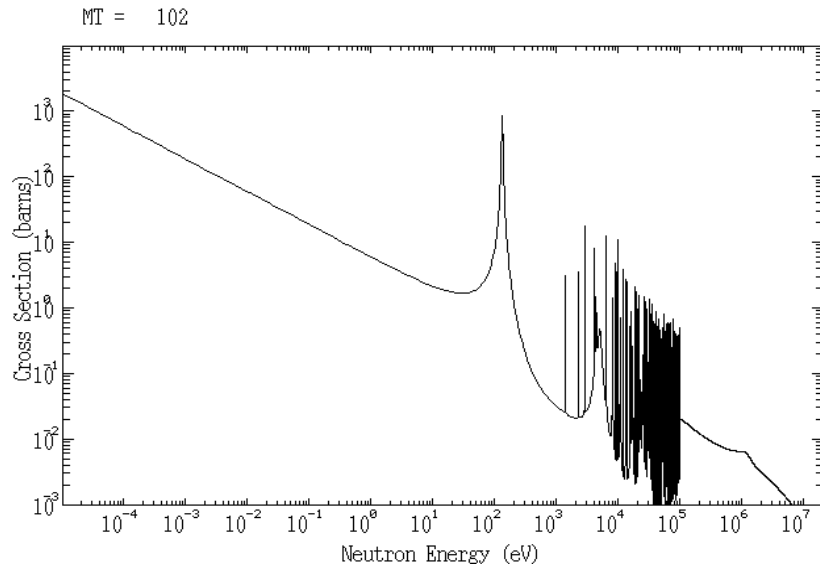


그림 1  $^{59}\text{Co}(n,r)^{60}\text{Co}$  에너지에 따른 반응 단면적

### (1) MCNP -ORIGEN2 계산방법

MCNP/ORIGEN 전산체계는 MCNP 코드를 이용하여 노심 외곽 구조물의 중성자속 분포 및 반응 단면적을 계산하고 여기서 얻어진 반응 단면적을 ORIGEN-2에 적용하여 조사에 따른 핵종의 방사능 양을 평가할 수 있는 체계이다.

원자로 주요 구조물인 압력용기의 중성자속 계산에서는 핵단면적 자료집, 중성자 선원항의 적용 문제, 원자로 형태의 모델링, 사용 수송방정식의 계산수단 등의 불확실성에 따라 그 결과의 차이가 있을 수 있다. 그러나 몬테카를로 방법(Monte Carlo Method)을 적용하면 기존에 각분할 방법을 사용하던 코드가 극복할 수 없는 여러 가지 사항을 해결할 수 있다<sup>[1]</sup>.

MCNP 코드는 Monte Carlo 방법론을 이용하여 중성자 수송방정식의 해를 얻으며, 난수(random number)를 생성하여 임계도 해석은 물론 중성자, 전자, 광자 또는 중성자-광자 연계문제를 통계적으로 해석하여 그 자료로서 핵단면적, 균정수를 생산할 수 있는 코드이다. MCNP 코드의 특징은 다음과 같다. 첫째, 기하학적 형태에 대한 자유도가 매우 높으므로 복잡하게 구성되어 있는 실제 문제를 3차원적으로 거의 완벽하게 묘사할 수 있다. 따라서 실험을 통하여 검증할 수 없는 문제의 검증용 코드로서 널리 사용한다. 둘째, 입자 하나 하나의 거동을 Tallying에 의하여 통계적으로 분석한 후 그 자료를 가지고 핵적 거동을 계수하므로 계산과정상의 근사가 매우 적고, 연속 핵자료집(pointwise cross section)을 사용하므로 반응단면적에 대한 균축약을 하지 않으므로 신뢰성이 매우 높다. 그러나 연소이력 계산이 수행되지 않는다는 점과 상업용원자로나 차폐체의 해석시 신뢰성 있는 결과를 산출하기 위해서는 계산시간이 많이 소요되는 단점이 가장 취약점으로 존재한다<sup>[7,8]</sup>.

ORIGEN-2 코드는 원자로를 일점으로 보고 문제를 해석하므로 기하학적 형태에 대한 묘사가 전혀 없으며 단일 그룹 반응 단면적을 라이브러리로 사용한다. 현재 ORIGEN-2의 라이브러리는

노심영역을 기준으로 생산되었으므로 노심외곽 선원항의 평가에 보정없이 적용하면 많은 오차를 기인할 수 있다. 그러므로 핵단면적에 대한 보정이 필요한데, 이는 MCNP를 이용하여 단일군으로 핵반응 단면적을 생산하고 이를 ORIGEN 라이브러리에 대체하여 사용하면 중성자 선원항에 대한 모사를 매우 정확히 수행 할 수 있다<sup>[1]</sup>.

그림 2는 MCNP/ORIGEN-2 체계의 흐름도를 도식화한 것이다.

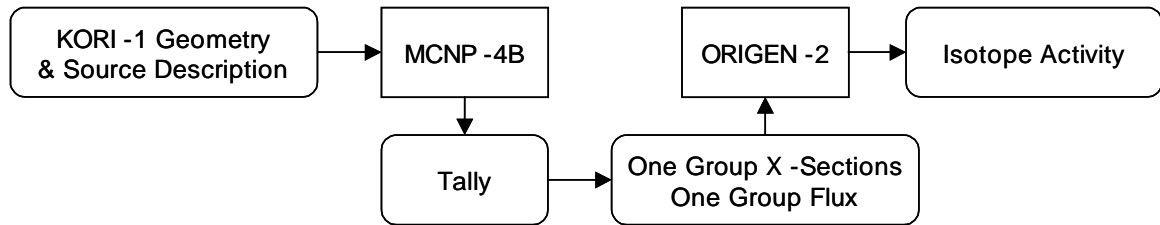


그림 2 MCNP/ORIGEN-2 계산 수행 절차

## (2) MCNP/ORIGEN-2 체계의 적용 타당성 검토

앞서 구축된 MCNP/ORIGEN-2 해석체계의 필요성을 확인하기 위해 MCNP-4B 코드를 이용하여 우선적으로 노심과 노심외곽의 중성자 스펙트럼의 차이를 검토해 보았다. 계산에 적용된 원자로는 표준형 원자로인 울진 3/4호기의 원자로를 적용하였으며 표 1 및 그림 3은 울진 3/4호기 집합체 제원을 나타내었다.

표 1 울진 3/4호기 제원

| 구조물명          | 제 원                     | 구조물명           | 제 원             |
|---------------|-------------------------|----------------|-----------------|
| 핵연료           | 3.34w/o UO <sub>2</sub> | Assembly Pitch | 20.778 cm       |
| pellet radius | 0.413 cm                | Baffle         | Zry-4 (1 cm)    |
| 피복관 외반경       | 0.485 cm                | Barrel         | SUS 304 (5 cm)  |
| Rod Pitch     | 1.285 cm                | Vessel         | SUS 304 (20 cm) |

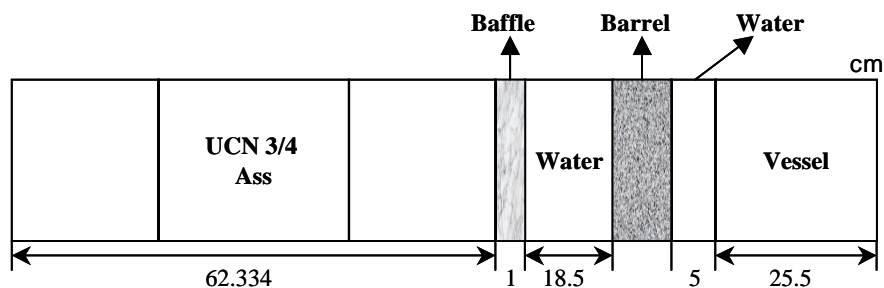


그림 3 울진 3/4호기 제원

계산 결과, 그림 4에 보듯이 노심에서의 스펙트럼은 중성자의 에너지가 매우 높은 에너지 영역으로 치우쳐 있음을 볼 수 있으며, 그림 5에서 보듯이 압력용기 안쪽 면에서의 중성자 스펙트럼은

차폐체인 물층을 통과하면서 열중성자화 되어 매우 낮은 에너지 영역으로 치우쳐져 있음을 볼 수 있다. 이는 노심 전체모델로부터 평가된 스펙트럼은 아니지만, 노심 전체를 모델링하여 특성을 분석한다 할지라도 이처럼 압력용기쪽의 중성자 스펙트럼이 낮은 에너지 영역으로 치우쳐 있다는 사실은 자명한 일이다.

앞서 평가된 스펙트럼을 바탕으로 압력용기의 주요 핵종들에 반응 단면적을 MCNP로 평가하여 내장된 ORIGEN-2의 PWRU 라이브러리와 비교하였다. 표 2는 압력용기에서의 반응단면적 값을 나타낸다. 표 2의 계산결과를 보면 노심쪽은 비교적 MCNP와 ORIGEN의 반응단면적 값이 잘 일치하고 있으나, 노심외곽의 경우는 노심과 압력용기의 스펙트럼 차이로 인해 압력용기 부근의 반응 단면적값이 보다 높은 값을 보여주고 있다. 따라서, ORIGEN 라이브러리를 보정없이 사용하면 상대적으로 적은 선원량의 평가가 이루어지게 되므로 반드시 반응단면적의 보정이 필요함을 알 수 있다.

위의 계산을 통하여 압력용기 부근의 중성자 스펙트럼의 정확한 평가가 매우 중요하다는 것을 알 수 있으며, 따라서 MCNP 코드를 이용하여 정확한 스펙트럼을 평가해야 하며, 선원량 평가에 있어 MCNP/ORIGEN-2 코드의 적용은 타당할 것으로 판단된다.

표 2 ORIGEN-2 와 MCNP의 반응 단면적 비교

단위 : barn

| 주요 핵종 | ORIGEN-2 | MCNP(노심/압력용기) |
|-------|----------|---------------|
| Fe-54 | 0.196    | 0.2/0.64      |
| Co-59 | 4.9      | 4.8/11.2      |
| Ni-61 | 0.22     | 0.21/0.69     |

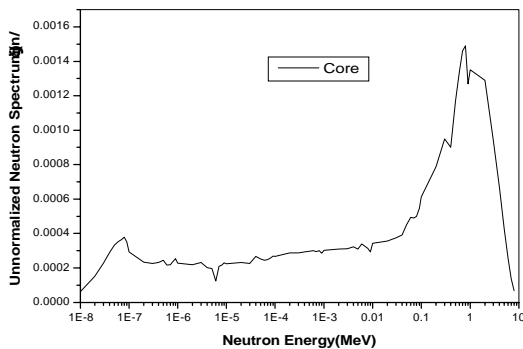


그림 4 Unnormalized Neutron Spectrum in Core

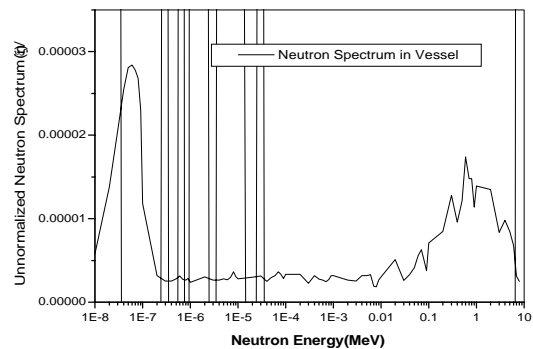


그림 5 Unnormalized Neutron Spectrum in Vessel

### III. 고리 1호기 초기 노심의 MCNP 모델링 검증

#### (1) 고리 원자력 1호기의 노심 특성

본 연구의 압력용기 방사화 선원량의 평가 대상인 고리 원자력 1호기의 노심은 121개의 핵연료 집합체로 구성되어 있으며, 각 핵연료집합체는 14×14로 핵연료봉이 나열되어 있다. 한 개의 집

합체에는 179의 핵연료봉과 1개의 계측기 안내관, 16개의 가연성 독봉 혹은 제어봉 안내관이 들어 있다. 핵연료 집합체의 농축도는 3.2w/o, 2.83w/o, 2.1w/o의 3가지로 되어 있다. 가연성 독봉 (burnable poison, B.P.)은 Borosilicate Glass(Pyrex)로 되어 있고 B.P.의 유무에 따라서 총 8개의 핵연료 집합체 군으로 되어 있다. 고리 원자력 1호기의 초기 노심의 주요 설계자료는 표 3과 같 으며, 고리 원자력 1호기 노심의 핵연료 집합체 장전모형은 그림 6과 같다.<sup>[9]</sup>

표 3 고리 원자력 1호기 1주기의 노심 주요 제원

|                            |                              |                            |                         |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Thermal Power              | 1723.5MWt                    | Cladding Outer Radius      | 0.535940 cm<br>zircaloy |
| Total Mass Flow Flux       | 2.4E-6 lb/hr-ft <sup>2</sup> | Pod Pitch                  | 1.41224 cm              |
| Reactor Pressure           | 2250 psia                    | Number of Control Banks    | 6                       |
| Number of Assembly in Core | 121                          | Assembly Pitch             | 19.81962 cm             |
| Fuel Pin Radius            | 0.454693 cm                  | Core Inlet Coolant Temp.   | 540.2 °F                |
| Gap Outer Radius           | 0.474218 cm                  | Core Average Coolant Temp. | 577.2 °F                |

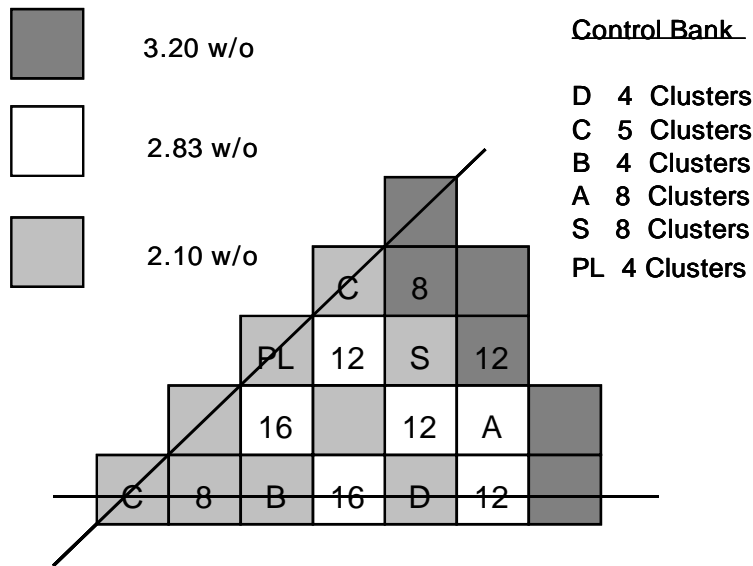


그림 6 고리1호기 초기노심 장전모형

## (2) 고리 1호기 노심의 MCNP 모델링

앞의 절에서 설명한 제원을 바탕으로 MCNP 코드로 고리 1호기 초기 노심에 대한 모델링을 수행하였다. 노심 전체를 있는 그대로 묘사하기에는 원자로의 크기가 매우 방대하고 또한 고리 1호기 초기 노심은 원주 방향으로 보면 대칭을 이루므로 원주 방향에 대해서는 1/8만을 묘사하였다.

축방향에 대해서는 엄밀히 말해 냉각수가 로심 바닥에서 상부로 올라가므로 아래쪽이 냉각재 온도가 낮아 감속재의 수밀도가 높고 위쪽으로 갈수록 냉각재의 온도가 높아 감속재의 수밀도가 낮다. 따라서 축방향에 대해서는 중성자속이 초기 노심에서는 아랫 쪽으로 치우치나 대칭성을 가정하여 1/2만을 묘사하였다. 축방향에 대해서는 4개의 노드로 나누어 핵연료 봉 Cell을 구성하였다. 노심의 냉각재 온도는 577K 으로 가정하여 감속재의 수밀도를 산정하였다. 노심의 제원은 실제 제원을 바탕으로 핵연료봉 하나하나를 세밀히 묘사하였다.

이렇게 묘사된 입력문을 KCODE를 실행시켜 각 핵연료봉 Cell 별로 출력분포를 구하고 이를 고정 선원(Fixed Source) 문제의 선원항으로 사용하여 중성자속 및 압력용기를 구성하고 있는 핵종별 중성자 흡수 단면적을 산출하였다.

그림 7은 MCNP로 모델링된 1/8 노심의 기하학적 형태를 나타낸다. 또한, 표 4는 고리 원자력 1호기의 모사에 사용된 각 물질별 핵종 수밀도가 기재되어 있다.

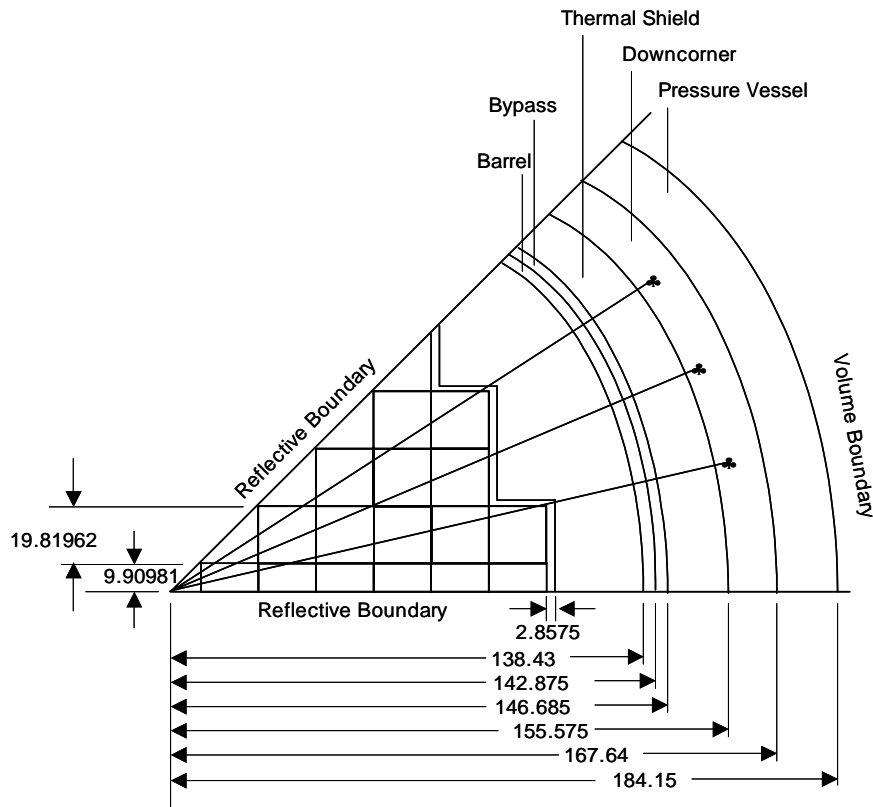


그림 7 Cross Sectional View of Kori Unit 1 of MCNP Model

표 4 각 물질별 핵종 수밀도

| Structure             | Composition and Atomic Weight | and Atomic (#/cm-barn)  | Structure               | Composition and Atomic Weight | and Atomic (#/cm-barn)  |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Pressure Vessel Steel | C <sup>12</sup>               | 7.98 × 10 <sup>-4</sup> | Pressure Vessel Steel   | Ni <sup>58</sup>              | 4.28 × 10 <sup>-4</sup> |
|                       | Si <sup>28</sup>              | 3.92 × 10 <sup>-3</sup> |                         | Ni <sup>60</sup>              | 1.59 × 10 <sup>-4</sup> |
|                       | P <sup>31</sup>               | 1.08 × 10 <sup>-5</sup> |                         | Ni <sup>61</sup>              | 6.81 × 10 <sup>-6</sup> |
|                       | S <sup>32</sup>               | 1.50 × 10 <sup>-5</sup> |                         | Ni <sup>62</sup>              | 2.13 × 10 <sup>-5</sup> |
|                       | V <sup>51</sup>               | 9.40 × 10 <sup>-6</sup> |                         | Ni <sup>64</sup>              | 5.28 × 10 <sup>-6</sup> |
|                       | Cr <sup>52</sup>              | 3.41 × 10 <sup>-4</sup> |                         | Mo <sup>92</sup>              | 5.06 × 10 <sup>-5</sup> |
|                       | Mn <sup>55</sup>              | 5.23 × 10 <sup>-4</sup> |                         | Mo <sup>94</sup>              | 3.09 × 10 <sup>-5</sup> |
|                       | Fe <sup>54</sup>              | 5.04 × 10 <sup>-3</sup> |                         | Mo <sup>95</sup>              | 5.26 × 10 <sup>-5</sup> |
|                       | Fe <sup>56</sup>              | 7.63 × 10 <sup>-2</sup> |                         | Mo <sup>96</sup>              | 5.45 × 10 <sup>-5</sup> |
|                       | Fe <sup>57</sup>              | 1.73 × 10 <sup>-2</sup> |                         | Mo <sup>97</sup>              | 3.09 × 10 <sup>-5</sup> |
| Fe <sup>58</sup>      | 2.27 × 10 <sup>-7</sup>       | Mo <sup>98</sup>        | 9.47 × 10 <sup>-5</sup> |                               |                         |
| Co <sup>59</sup>      | 4.88 × 10 <sup>-6</sup>       | Mo <sup>100</sup>       | 3.02 × 10 <sup>-5</sup> |                               |                         |

### (3) 고리 1호기 초기 노심의 MCNP 모델링 검증

앞서 묘사된 MCNP 모델링의 타당성을 검증하기 위해 고리 1호기 1주기 노심에 대한 주기초 (BOL)에 대한 노심계산을 수행하여 노심 평면 출력분포를 산정한 후 이를 FSAR의 값과 비교하였다. 이때, 핵연료의 실제 온도는 약 1033 K, 피복재의 온도는 608 K, 냉각재의 온도는 577 K 정도가 된다고 문헌상에 보고되고 있으나<sup>[3]</sup>, 본 연구에서는 이 온도에 적합한 핵반응 단면적 라이브러리가 없어 냉각재 및 피복재에 대해서는 600 K에 대한 핵반응 단면적 라이브러리를 사용하였으며, 핵연료에 대해서는 900 K 핵반응 단면적 라이브러리를 사용하였다. 핵반응 단면적 자료집은 ENDF-VI에서 만들어진 핵자료를 중심으로 사용하였다.

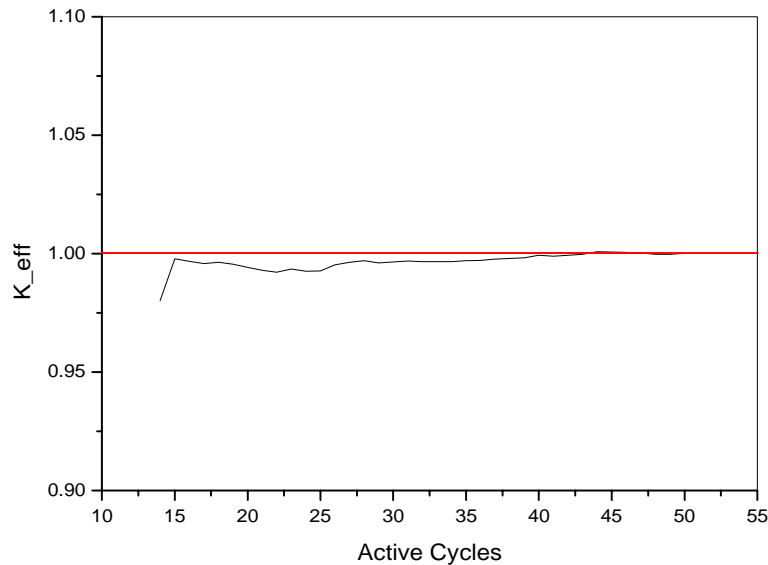


그림 8 K\_eff Value in MCNP Calculation

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |       |       |       |       |       |       | 0.722 |
|       |       |       |       |       |       |       | 0.669 |
|       |       |       |       |       |       |       | -7.40 |
|       |       |       |       |       | 1.120 | 1.043 | 0.608 |
|       |       |       |       |       | 1.040 | 0.965 | 0.565 |
|       |       |       |       |       | -7.18 | -7.45 | -7.12 |
|       |       |       |       | 1.146 | 1.179 | 1.062 | 0.778 |
|       |       |       |       | 1.127 | 1.157 | 1.000 | 0.730 |
|       |       |       |       | -1.70 | -1.84 | -5.83 | -6.14 |
|       |       | 1.094 | 1.080 | 1.144 | 1.151 | 1.132 | 0.662 |
|       |       | 1.127 | 1.125 | 1.156 | 1.153 | 1.107 | 0.637 |
|       |       | 2.98  | 4.20  | 3.16  | 0.17  | -2.21 | -3.78 |
| 1.081 | 0.986 | 1.105 | 1.096 | 1.145 | 1.064 | 0.821 |       |
| 1.136 | 1.008 | 1.146 | 1.155 | 1.168 | 1.150 | 0.781 |       |
| 5.11  | 2.21  | 3.73  | 5.35  | 2.01  | -1.35 | -4.91 |       |

Root Mean Square Error = 4.377

그림 9 Assembly Relative Power Distribution[BOL]

그림 8은 선원의 분포를 산출하기 위해 KCODE를 실행시켰을 때의 MCNP Active Cycle에서의



임계도 계산 결과를 나타낸다. 그림에서 보듯이 K-eff 값은 임계 값인 1.0에 근접하고 있어 모델링의 적절함을 보여준다.

그림 9는 MCNP로부터 산출된 노심 평면 출력분포 및 FSAR에서 제시하는 고리 1호기 초기노심(BOL)의 평면출력 분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 상호간의 오차는 RMSE(Root Mean Square Error) 값이 4.377 % 이내로서 일치하여 본 연구에서 모델링된 MCNP의 모델링은 매우 타당함을 볼 수 있다.

#### IV. 계산결과 및 분석

##### (1) MCNP를 이용한 압력용기 중성자속 분포 계산 결과

앞서 산출된 핵연료봉 출력분포를 고정선원으로 사용하여 압력용기 각위치에서의 중성자속 및 각 핵종에 대한 핵반응 단면적을 산출하였다. 그림 10은 중성자속이 산출된 영역의 표시를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 압력용기는 반경(radial)방향으로 10의 Cell로 나누어져 있으며, 방위각(azimuthal angle)을 따라 5° 씩 나누어져 9개의 Cell로 나누어져 있으며, 축방향으로 4개로 나누어져 있다. 따라서 MCNP의 결과 값은  $10 \times 9 \times 4 = 360$  개의 Cell에 대해 중성자속 및 ORIGEN2에 사용될 단일그룹으로 축약된 핵종별 중성자 포획단면적(one-group collapsed capture cross section)이 산출된다.

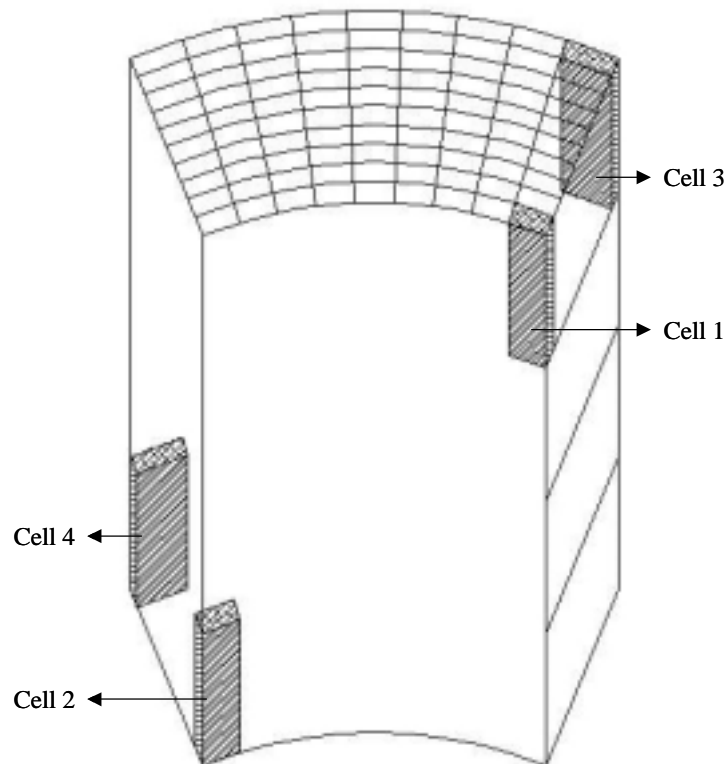


그림 10 중성자속 산출영역

압력용기를 구성하고 있는 각 핵종별 단일군으로 축약된 중성자 흡수 단면적(one-group capture cross section)은 최종적으로 ORIGEN2의 중성자속 입력 값 및 반응 단면적 라이브러리

정보로 이용되며, 이를 통해 압력용기에서의 각 핵종별 방사능 및 총 방사능 양이 현재까지의 고리 원자력 1호기 운전이력에 따라 산출된다. 표 5에는 각 압력용기 위치별 중성자속이 기재되어 있다.

그림 11은 압력용기를 구성하고 있는 각 핵종에 대한 방위각, 축방향, 압력용기 위치에서의 반경방향 중성자속 분포를 나타낸다. 예상했던 바와 같이, 압력용기 바깥쪽으로 갈수록 단일군 중성자속(one-group neutron flux)은 급격히 감소함을 볼 수 있으며, 중성자 흡수 반응단면적은 증가함을 볼 수 있다.

표 5 압력용기 위치별 중성자속

| 위 치  |        |              |           | 총중성자속<br>(#/cm <sup>2</sup> sec) |
|------|--------|--------------|-----------|----------------------------------|
| cell | radius | longitudinal | angle     |                                  |
| 1    | 1st    | 1st          | 0° ~ 5°   | $6.09 \times 10^{11}$            |
| 2    | 1st    | 4th          | 40° ~ 45° | $4.79 \times 10^{10}$            |
| 3    | 10th   | 1st          | 0° ~ 5°   | $5.42 \times 10^{10}$            |
| 4    | 10th   | 4th          | 40° ~ 45° | $5.11 \times 10^9$               |

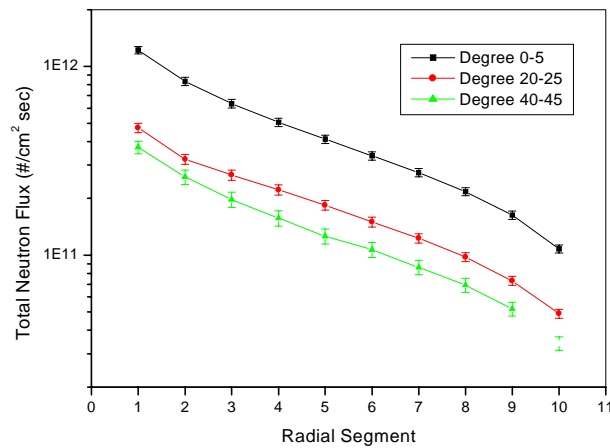


그림 11 압력용기 반경방향 중성자속 분포

#### 4.2 ORIGEN-2 코드를 이용한 압력용기 선원항 평가

앞서 MCNP 코드를 통해 산출된 중성자속 및 핵반응 단면적을 이용하여 고리 1호기 실제 운전 이력을 따라 19주기의 연소이력을 계산하고, 그 이후의 주기는 현재 고리 1호기가 19주기 운전중에 있으므로 앞에서 언급한바와 같이 고리 1호기의 수명을 30년으로 가정하여 연소이력을 추정하였다.

표 6 압력용기 위치별 총방사능

| 위 치  |        |              |           | 총방사능<br>(Bq/t)        |
|------|--------|--------------|-----------|-----------------------|
| cell | radius | longitudinal | angle     |                       |
| 1    | 1st    | 1st          | 0° ~ 5°   | $1.98 \times 10^{13}$ |
| 2    | 1st    | 4th          | 40° ~ 45° | $1.63 \times 10^{12}$ |
| 3    | 10th   | 1st          | 0° ~ 5°   | $1.88 \times 10^{11}$ |
| 4    | 10th   | 4th          | 40° ~ 45° | $1.61 \times 10^{10}$ |

표 6에는 압력용기 각 위치에서의 총 방사능 양이 기재되어 있다. 표에서 보듯이 최대 방사화 지역은 cell 1의 위치임을 알 수 있으며, 총 방사능양은 폐로 예정 시점인 2008년을 기준으로 약  $1.98 \times 10^{13}$  Bq/t 인 것으로 평가되었다.

그림 12는 cell 1~4에서 냉각시간에 따른 방사능을 나타내고 있다. 방사화는 노심에서 떨어질 수록 중성자속이 감소하므로 방사능의 절대 값은 감소함을 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 원자로 정지시점에서 약 10년까지는 Fe-55, Mn-54, Co-50, Ni-59, Ni-63의 핵종이 총 방사능의 약 95% 정도를 차지하였으며, 이중에서도 특히, Fe-55가 방사능의 대부분을 차지하는 것으로 확인되었다. 냉각기간 10년 이후에는 Ni-63이 대부분의 방사능을 차지하는 것으로 나타났으며, 약 50년 이상 냉각 후의 총 방사능양은 원자로 정지시점과 비교하여 약 0.3% 이하로 감소하는 것으로 평가되었다.

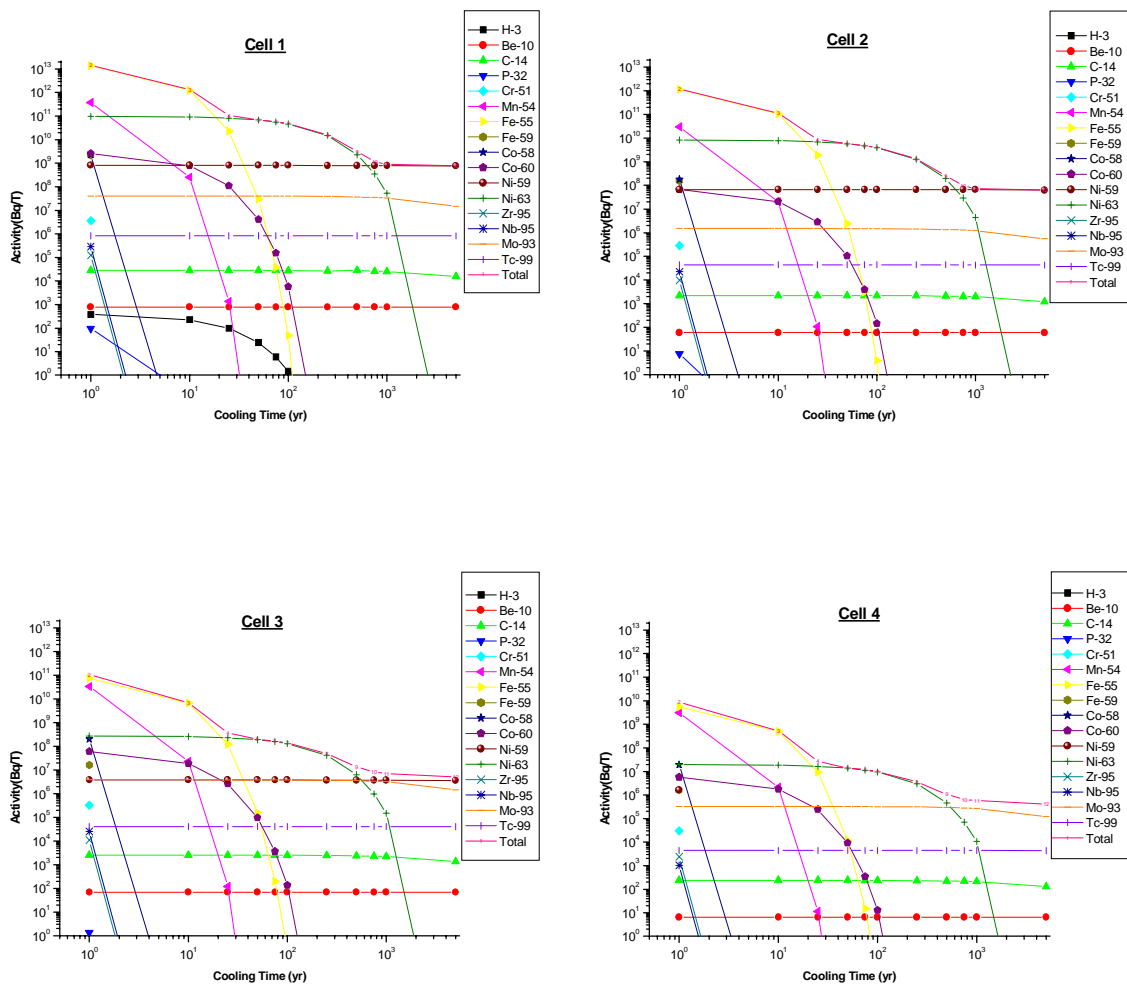


그림 12 압력용기 위치별 냉각시간에 따른 방사능

## V. 결 론

본 연구에서는 원자로 구조물 방사선원항 평가체계로 MCNP/ORIGEN-2 코드 체계를 제시하였다. 내장된 ORIGEN-2의 라이브러리는 노심영역을 기준으로 생산되었기 때문에 노심외곽 선원항 평가에 보정없이 적용하면 약 200%정도의 오차를 유발하므로 반응단면적의 보정은 매우 중요함을 확인하였다. 구축된 MCNP/ORIGEN2 체계를 이용하여 고리 1호기 원자로 압력용기에 대한 선원항 평가를 위한 계산을 수행한 결과, 중성자속이 가장 높은 지점은 '1st radius - 1st longitudinal - 0° ~5° angle' 지점으로 약  $6.09 \times 10^{11}$  #/cm<sup>2</sup> sec 정도의 값을 나타내었으며, 방사능양은 폐로 예정 시점인 2008년을 기준으로 약  $1.98 \times 10^{13}$  Bq/t 인 것으로 평가되었다. 원자로 정지 시점에서 약 10년까지는 Fe-55, Mn-54, Co-50, Ni-59, Ni-63의 핵종이 총 방사능의 약 95% 정도를 차지하였으며, 이중에서도 특히, Fe-55가 방사능의 대부분을 차지하는 것으로 확인되었다. 냉각기간 10년 이후에는 Ni-63이 대부분의 방사능을 차지하는 것으로 나타났으며, 약 50년 이상 냉각 후의 총 방사능양은 원자로 정지시점과 비교하여 약 0.3% 이하로 감소하는 것으로 평가되었다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 사업의 지원에 의해 수행되었으며, 본 연구에 많은 자료를 제공하여 주신 한양대학교 김종경 교수님께 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- [1] 박광현 외, "원자력시설 해체 사고해석에 관한 연구," KINS/HR-385, 한국원자력안전기술원, 경희대학교, 2001
- [2] 황주호 외, "TRIGA연구로 폐로 선원항 평가 및 폐기물 처리 요건 연구", KINS/HR-278, 한국원자력안전기술원, 경희대학교, 1999
- [3] 김종경 외, "몬테칼로 모사를 이용한 차세대 원자로 압력용기 건전성 평가," 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
- [4] E.F. Love, K.A. Pauley, B.D. Reid, "Use of MCNP for Characterization of Reactor Vessel Internals Waste from decommissioned Nuclear Reactors", INEL-95/0419, Lockheed, 1995
- [5] J.F. Briesmeister, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [6] A. G. Croff. "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code", ORNL
- [7] 김종경, "몬테칼로 모사를 이용한 원자로 압력용기에 대한 중성자 조사량계산," 기초전력공학공동연구소, 한양대학교, 1996
- [8] 김종경 외, "원자로 압력용기내 속중성자량 계산을 통한 몰데칼로 방법과 3차원 각분할법의 비교평가," 2000 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
- [9] "KORI UNIT 1, Final Safety Analysis Report, Vol III", 한국전력공사 기술안전 지원처 안전분석부, 1976
- [10] 김동규, "원자로 압력용기의 중성자 조사량 감소 방안 및 평가 연구" 경희대학교 석사학위논문, 1997