



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

토륨 연료를 이용한 핵변환  
미임계로 설계

Design of Thorium-Fueled Subcritical Reactor  
Core for TRU Transmutation

2020년 2월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
이 승 철

토륨 연료를 이용한 핵변환  
미임계로 설계

Design of Thorium-Fueled Subcritical Reactor  
Core for TRU Transmutation

지도교수 심형진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2020년 2월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
이 승 철

이승철의 석사 학위논문을 인준함  
2020년 2월

위 원 장           황 용 석           (인)

부위원장           심 형 진           (인)

위 원           정 경 재           (인)

## 국문초록

토륨은 우라늄보다 더 많은 매장량과 더 넓은 분포 면적을 가지고 있다. 또한, 토륨을 장전할 경우, 장주기 악티나이드가 거의 생성되지 않는다. 미임계로는 임계사고가 원천적으로 일어날 수 없으며, 임계로에 비해 더 많은 악티나이드 장전이 가능하다. 토륨 장전 미임계 원자로는 이와 같은 장점들이 존재하며, 이 원자로의 노심을 설계하는 다양한 연구들이 있었다. 하지만, 기존의 연구들에서 사용한 코드체계는 연소계산 시 외부 중성자 선원이 고려된 중성자속을 사용할 수 없는 단점이 있다.

국내에서 설계된 미임계 원자로에는 HYPER가 있다. 이 원자로와 결합한 양성자 가속기는 선형가속기이다. 하지만, 선형가속기는 사이클로트론에 비해 동일 에너지 당 건설비용이 상대적으로 비싸다는 단점이 있다.

본 연구에서는 사이클로트론을 결합한 토륨 장전 미임계 원자로 노심을 설계하는 것을 목표로 하였다. 이때 설계기준은 '최소의 요구 빔 출력', '최대의 초우라늄원소 핵변환', '최대의 U-233 증식'이다. 설계에 사용된 코드는 몬테카를로 입자수송해석 코드인 McCARD 이다.

핵연료 집합체와 반사체 집합체는 육각형 모형이며, 각각 162개와 102개가 장전되었다. 또한, 유효노심 높이는 70cm이다. 핵연료 내 초우라늄원소 조성은 PWR에서 45,000 MWD/MTU 연소도로 방출된 후, 10년 냉각을 거쳐 PyroGreen 공정을 거친 후의 조성이다. 양성자 가속기는 SINQ 사이클로트론을 선정하였으며, 최대 빔 출력과 양성자 에너지는 각각 1.8 MW, 590 MeV이다.

미임계로의 열 출력은 MCNP 6.2와 McCARD를 이용하여 계산

하였다. 이는 가속기 사양과 MCNP 6.2 계산으로 구한 핵 파쇄 표적에서 빠져나오는 양성자 1개당 중성자 수, McCARD를 통해 구한 중성자 1개당 핵분열 에너지를 이용하여 구할 수 있다. 이때 원자로가 최대 빔 출력으로 일정한 열 출력을 유지한다는 전제하에 열 출력을 계산하였다. 계산 결과 열 출력은 377.329 MWth이었다.

다음으로 대상 노심들에 대해 1년 동안 냉각이 가능한 최대 열 출력인 59.3737 MWth을 유지하는데 필요한 빔 출력이 최소이고, 최대의 핵변환 성과와 U-233 증식 성능을 갖는 형상을 결정하였다. 이때 성능지수를 도입하여 형상을 결정하였다. 성능지수는 주기 말 요구 빔 출력이 낮을수록, 핵 변환율과 U-233 증식률이 높을수록 크게 나온다. 또한, 대상 노심들의 안전 변수인 유효 지발 중성자 분율, 냉각재 보이드 가, 도플러 반응도 계수를 계산해 보았다. 계산 결과, 장전된 토륨 질량이 적고, 초우라늄원소가 많을수록 유효 지발중성자 분율이 낮게 나왔다. 또한, 대상 노심들의 주기 초~주기 말의 냉각재 보이드 가와 도플러 반응도 계수가 음의 값을 가지는 것을 확인하였다.

**주요어 :**

토륨

미임계로

핵변환

몬테카를로

McCARD

학 번 : 2014-22724

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구배경 및 목적 .....	1
제 2 절 논문의 구성 .....	3
제 2 장 노심 형상 및 설계변수 .....	4
제 1 절 노심 형상 .....	4
제 2 절 집합체 및 핵연료봉 형상 .....	7
제 3 절 기타 설계변수 .....	10
제 3 장 미임계로 열 출력 계산 .....	12
제 1 절 MCNP6.2/McCARD를 이용한 열 출력 계산	12
1. $n_{out}$ 계산 결과와 핵 파쇄 중성자 분포 .....	13
2. 토륨과 초우라늄원소의 질량비 결정 .....	19
3. $P_{fission}$ 계산 결과 .....	20
4. 열 출력 계산 결과 .....	21
제 4 장 노심 형상 결정 .....	22
제 1 절 개요 .....	22
제 2 절 대상 노심 형상 .....	23
제 3 절 유효증배계수 및 출력 분포 변화 .....	26
제 4 절 핵 변환율과 U-233 증식률 .....	30
1. 핵 변환율 .....	30
2. U-233 증식률 .....	31
제 5 절 요구 빔 출력 .....	32

제 6 절 성능지수 .....	33
제 5 장 안전 변수 계산 .....	34
제 1 절 개요 .....	34
제 2 절 계산 결과 .....	34
제 6 장 결론 .....	38
참고문헌 .....	40
부록A. 집합체 개수 결정 .....	42
부록B. $P_{pin}, P_{assembly}, l$ 계산 .....	43
부록C. 빔 영역의 수평 및 수직 방향 단면도 ...	46
부록D. 냉각이 가능한 최대 열 출력 계산 .....	47

## 표 목 차

[표 2.1] (TRU)O <sub>2</sub> 내 우라늄과 초우라늄원소의 핵종별 조성비 .....	11
[표 2.2] 미임계로 기타 설계변수 .....	11
[표 3.1] 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수 .....	19
[표 3.2] $P_{fission}$ 계산 결과 .....	20
[표 3.3] $P$ 계산 결과와 $P_{fission}$ , $n_{out}$ , $P_{beam}$ , $E_p$ .....	21
[표 4.1] 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수 ( Case 2 ) .....	24
[표 4.2] 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수 ( Case 3 ) .....	24
[표 4.3] 대상 노심들의 장전된 초우라늄원소 질량과 핵 변환율 계산 결과 .....	30
[표 4.4] 대상 노심들의 장전된 토륨 질량과 U-233 증식률 계산 결과 .....	31
[표 4.5] 대상 노심들의 주기 초~ 주기 말 요구 빔 출력 계산 결과 .....	32
[표 4.6] 대상 노심들의 성능지수 계산 결과 .....	33
[표 5.1] 대상 노심들의 주기 초~주기 말 유효 지발중성자 분율 .....	37
[표 5.2] 대상 노심들의 주기 초~주기 말 냉각재 보이드 가 .....	37
[표 5.3] 대상 노심들의 주기 초~주기 말 도플러 반응도 계수 .....	37



[표 D.1] 생각이 가능한 최대 열 출력 계산에 필요한 각종  
데이터 ..... 49

## 그 립 목 차

[그림 2.1] 미임계로 노심의 수평 방향 단면도 .....	5
[그림 2.2] 미임계로 노심의 수직 방향 단면도 .....	6
[그림 2.3] 핵연료 집합체 수평 방향 단면도 .....	8
[그림 2.4] 핵연료봉의 수평 및 수직 방향 단면도 .....	9
[그림 3.1] $n_{out}$ 계산과 핵 파쇄 중성자 분포를 얻기 위한 MCNP 6.2 입력의 기하구조 .....	14
[그림 3.2] 핵 파쇄 중성자의 축 방향 분포 .....	16
[그림 3.3] 핵 파쇄 중성자의 높이 별 에너지 분포 .....	17
[그림 3.4] 핵 파쇄 중성자의 각( $\mu$ ) 분포 .....	18
[그림 4.1] 대상 노심들의 반경 방향 단면도와 핵연료 형태 .....	25
[그림 4.2] 대상 노심들의 1년 동안의 유효증배계수 변화 .....	27
[그림 4.3] 대상 노심들의 주기 초, 주기 중, 주기 말에서의 축 방향 출력 분포 .....	28
[그림 4.4] 대상 노심들의 주기 초, 주기 중, 주기 말에서의 반경 방향 출력 분포 .....	29
[그림 B.1] $p_{pin}, p_{assembly}, l$ 의 관계 도식 .....	43
[그림 C.1] 빔 영역의 수평(왼쪽) 및 수직(오른쪽) 방향 단면도 .....	46

# 제 1 장. 서론

## 제 1 절. 연구배경 및 목적

토륨은 우라늄보다 매장량이 약 3~4배가 많으며[1, 2], 더 넓은 분포 면적을 가지고 있다[2]. 또한, 장기간 관리가 요구되는 악티나이드를 거의 생성시키지 않는 장점이 있다[2, 3]. 이 외에도 고 방사성 핵종인 Tl-208이 중간물질로 생성되기에 사용후 토륨 핵연료 내 U-233 감지를 쉽게 할 수 있는 이점도 있다[1, 2].

미임계로는 원천적으로 임계사고의 가능성을 배제할 수 있고, 임계로에 비해 다량의 악티나이드를 장전시킬 수 있다[3]. 또한, 미임계로는 가속기의 빔 전류 조정으로 출력을 쉽게 제어할 수 있는 장점이 존재한다. [2]

G. P. Barros와 T. M. Vu. 등도 토륨 장전 미임계 원자로심 설계 연구를 수행한 바가 있다. G. P. Barros는 납 냉각 Seed-Blanket 형태의 토륨 가속기 구동 시스템에서 Seed 핵연료에 따른 U-233 증식량과 초우라늄원소(Transuranic, TRU)의 핵 변환량을 비교하였다[4]. T. M. Vu. 는 사용후 핵연료 내 초우라늄원소의 핵변환과 전력생산을 수행하는 토륨 장전 가속기 구동 시스템의 노심을 개념설계 하였다[5]. 또한, T. M. Vu.는 이전 연구[5]에서 설계된 노형의 연소 반응도 변화(reactivity swing)를 줄이는 것과 초우라늄원소의 핵변환 성능 개선을 목표로 연구를 진행하였다[6]. 이들의 연구에서 공통으로 사용한 코드체계는 MCNPX-CINDER90 이다. 하지만, 이 코드체계에서는 연소계산 시 외부

중성자 선원이 고려된 중성자속을 사용할 수 없다. 따라서, 이들의 연구는 임계도 계산 모드에서 얻은 중성자속으로 연소계산을 수행하였다는 한계가 있다.

국내에서 설계된 미임계 원자로에는 HYPER[7]가 있다. HYPER는 한국원자력연구원에서 설계한 핵변환 및 에너지 생산을 목적으로 한 미임계 원자로이다. 이 원자로에 사용되는 양성자 빔의 에너지와 전류는 각각 1 GeV, 16 mA이다. 하지만, 이러한 양성자 빔을 사용하기 위해서는 대규모의 선형가속기 사용이 요구된다[3]. 또한, 선형가속기와 사이클로트론의 동일 에너지 당 건설비용을 비교하면, 사이클로트론이 상대적으로 저렴하다[3]. 즉, HYPER는 상대적으로 비싼 가속기인 선형가속기를 사용해야 한다.

본 연구에서는 비교적 저렴한 사이클로트론을 결합한 토륨 장전 미임계로 노심을 설계하는 것을 목표로 하였다. 이때 설계기준은 ‘최소의 요구 양성자 빔 출력’, ‘최대의 초우라늄원소의 핵변환’, ‘최대의 U-233 증식’이다. 설계에 사용된 코드는 서울대학교에서 개발한 몬테카를로 코드인 McCARD[8] 이다.

## 제 2 절. 논문의 구성

1장에서는 연구의 배경과 연구의 목적을 서술하였다. 2장에서는 노심과 핵연료 집합체, 핵연료봉의 기하구조에 대한 설명과 선정된 가속기 사양을 포함한 기타 설계변수를 정리하였다. 3장에는 MCNP 6.2와 McCARD를 이용한 미입계로 열 출력 계산 방법과 계산 결과를 나타내었다. 4장에는 대상 노심들에 대한 설명과 연소계산 결과, 요구 빔 출력, 성능지수 계산 결과를 수록하였다. 5장에서는 대상 노심들의 안전 변수인 유효 지발중성자 분율, 냉각재 보이드 가, 도플러 반응도 계수 계산 결과를 정리하였다. 6장에서는 연구 결론을 기술하였다.

## 제 2 장. 노심 형상 및 설계변수

### 제 1 절. 노심 형상

그림 2.1.과 2.2.에는 각각 노심의 수평 및 수직 단면도를 나타내었다. 핵연료 집합체와 반사체 집합체 모두 육각형 모형이며, 이들의 면적은 TORIA[3]의 집합체 단면적과 동일하게 해주었다. 장전된 핵연료 집합체와 반사체 수는 각각 162개, 102개이며 이는 그림 2.1.에서 확인할 수 있다. 그림 2.1.과 그림 2.2.를 보면 노심 중앙에는 원기둥 모양의 양성자 빔 영역(Beam Section)과 핵 과쇄 표적으로 구성된 표적 채널(Target Channel)이 존재한다. 이때 빔 영역의 반경은 5.68cm이며, 이는 HYPER[7]에서의 양성자 빔 출력밀도와 동일하게 하기 위함이다. 또한, 그림 2.2.를 보면 유효노심 높이와 상·하부 Plenum 높이는 각각 70cm, 30cm임을 알 수 있다.

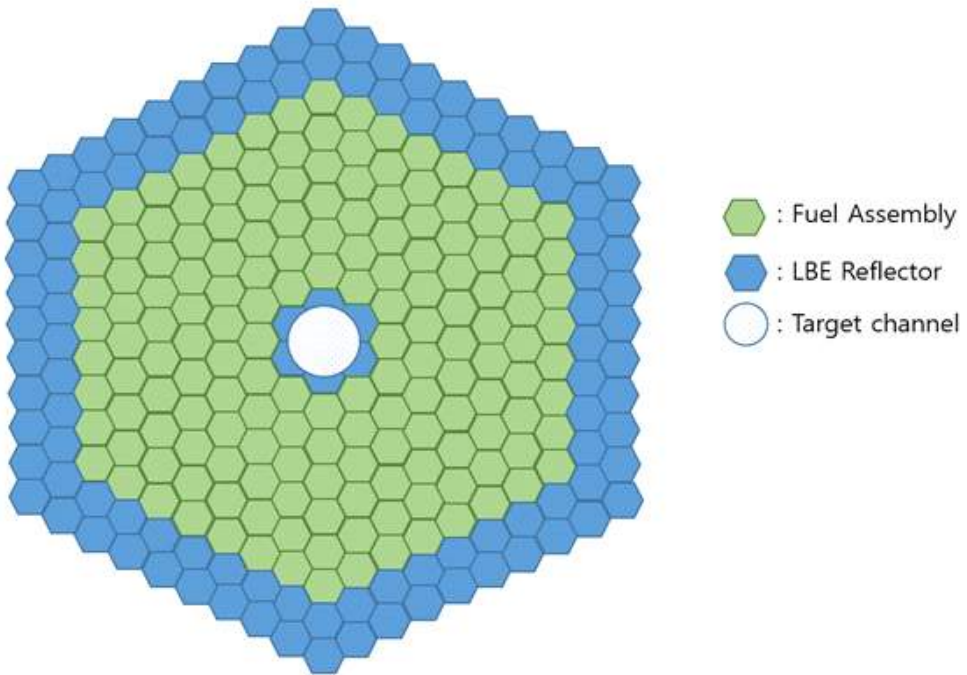


그림 2.1. 미임계로 노심의 수평 방향 단면도

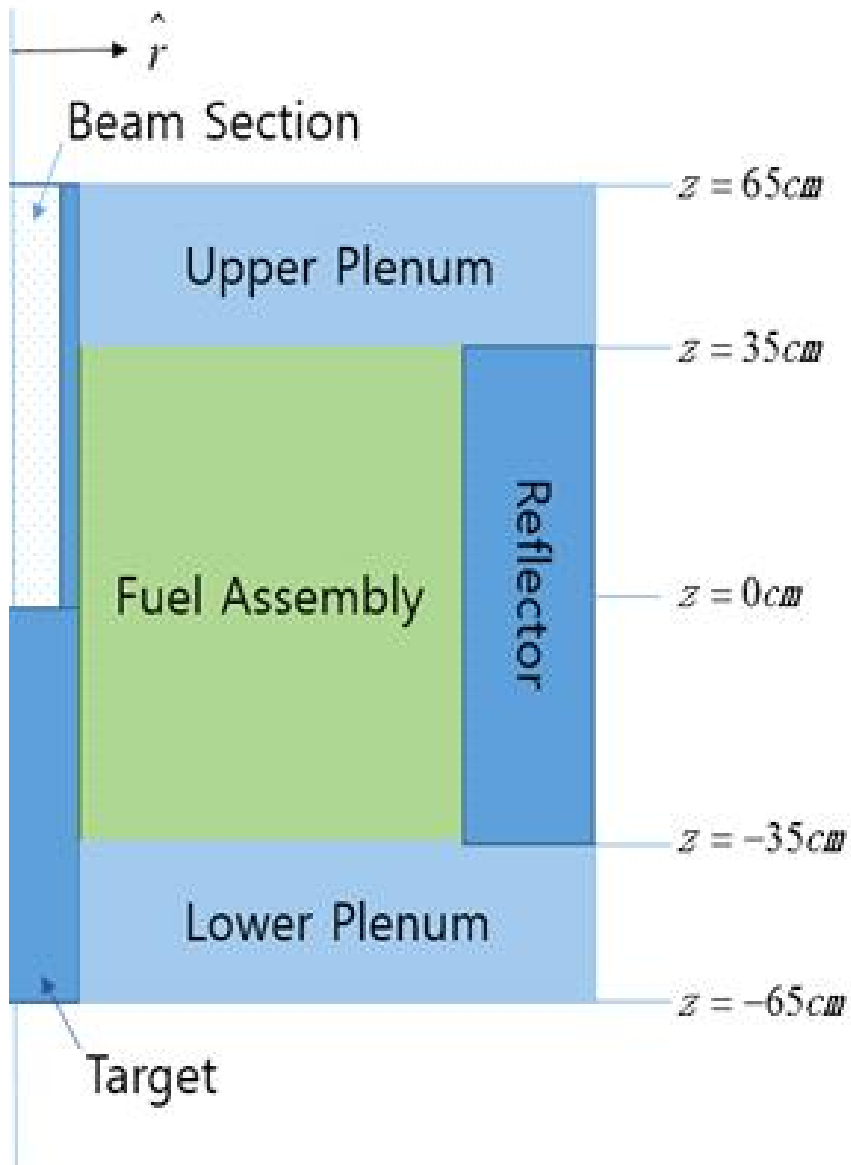


그림 2.2. 미임계로 노심의 수직 방향 단면도



## 제 2 절. 집합체 및 핵연료봉 형상

핵연료 집합체의 형상은 그림 2.3.에 나타내었다. 그림 2.3.을 보면, 집합체 한 변의 길이와 핵연료봉 간 간격(Pitch)은 각각 4.35cm와 0.97cm임을 알 수 있다. 또한, 집합체 내부를 보면 중심의 지지대(Skeletal Pin) 주위로 총 60개의 핵연료봉이 장전되어있다.

그림 2.4.는 핵연료봉의 수직 및 수평 방향 단면을 도시한 것이다. 이는 TORIA[3]의 핵연료봉과 동일하며, 핵연료 반경은 0.322cm, 피복재 내·외부 반경은 각각 0.33cm, 0.37cm이다.

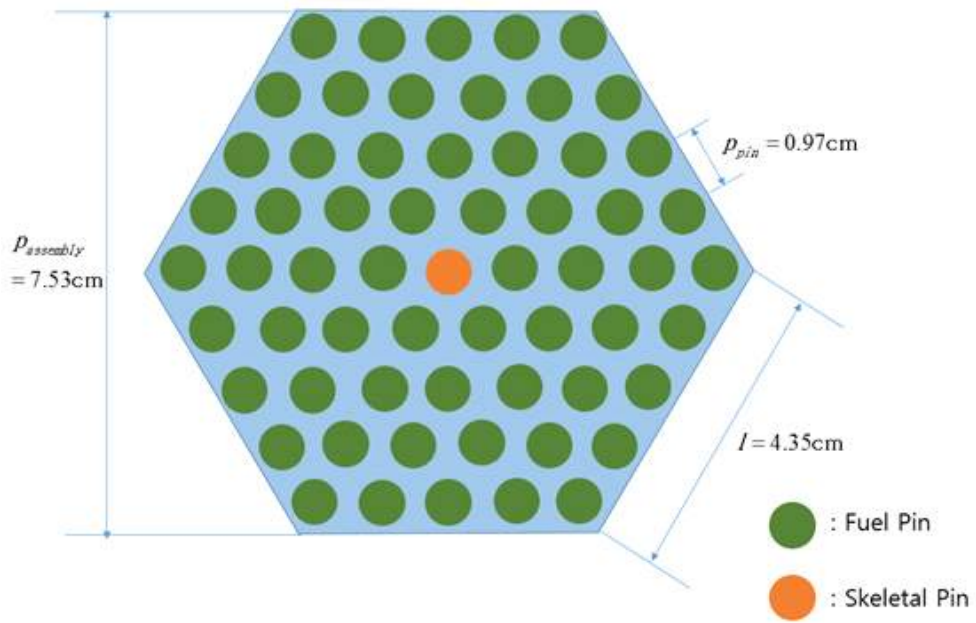


그림 2.3. 핵연료 집합체 수평 방향 단면도

< Fuel Pin >

< Radial Structure >

< Axial Structure >

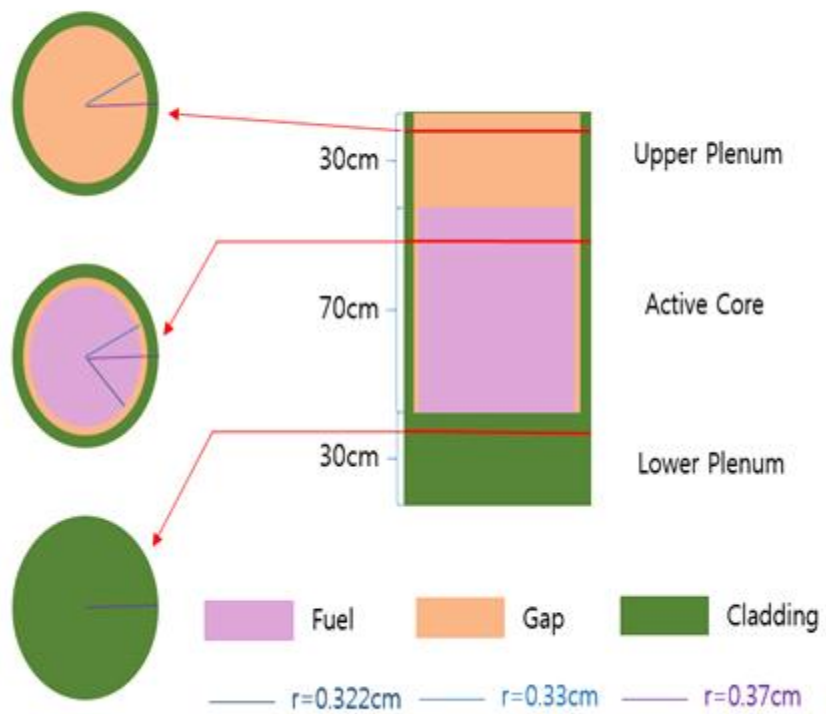


그림 2.4. 핵연료봉의 수평 및 수직 방향 단면도

### 제 3 절. 기타 설계변수

여기에서는 앞서 언급하지 않은 다른 설계변수들을 기술하였다. P/D(Pitch-to-Diameter)는 1.5이며, 이는 HYPER[7]랑 동일하다. 갭(Gap)과 피복재 물질은 각각 헬륨과 HT-9이며, 냉각재와 핵 파쇄 표적 물질은 납-비스무스 공융물(LBE) 이다.

핵연료는 이산화 토륨( $\text{ThO}_2$ )과  $(\text{TRU})\text{O}_2$ 가 혼합한 형태이다. 이때 초우라늄원소(TRU) 조성은 PWR에서 45,000 MWD/MTU 연소도로 방출된 후, 10년 냉각과정을 거쳐 PyroGreen[9] 공정을 통해 얻는다. 이 공정을 통해 얻어지는 우라늄과 초우라늄원소, 희토류의 질량비는 33.178:115.87:1.4715이다. 회수되는 희토류 질량은 우라늄과 초우라늄원소 질량에 비해 상대적으로 매우 적다. 따라서 연소계산에서 희토류의 조성은 무시하였다. 우라늄과 초우라늄원소의 핵종별 조성비[3]는 표 2.1에 나타내었다.

양성자 가속기는 SING[3] 사이클로트론을 선정하였으며, 최대 빔 출력과 양성자 에너지는 각각 1.8 MW와 590 MeV이다.

위 내용을 정리한 것을 표 2.2에 나타내었다.

표 2.1. (TRU)O<sub>2</sub> 내 우라늄과 초우라늄원소의 핵종별 조성비[3]

조성			
U(질량 소계 33.178)		TRU(질량 소계 115.87)	
U-234	1.99E-04	Np-237	4.59E-02
U-235	8.34E-03	Pu-238	1.36E-02
U-236	4.14E-03	Pu-239	5.18E-01
U-238	9.87E-01	Pu-240	2.38E-01
		Pu-241	7.75E-02
		Am-241	5.05E-02
		Am-242m	6.51E-05
		Am-243	8.81E-03
		Cm-243	2.83E-05
		Cm-244	1.68E-03
		Cm-245	8.78E-05
		Cm-246	1.05E-05
합계	1.00	합계	1.00

표 2.2. 미임계로 기타 설계변수

Parameter	Value	Parameter	Value
P/D	1.5	Gap Material	He
Cladding Material	HT-9	Coolant/Target	LBE
Fuel Type	(Th-TRU)O <sub>2</sub>	Maximum Beam Power	1.8 MW
Proton Energy	590 MeV		

## 제 3 장. 미임계로 열 출력 계산

### 제 1 절. MCNP 6.2 / McCARD를 이용한 열 출력 계산

미임계로의 열 출력은 식 (3.1)과 같이 계산한다.

$$P = P_{fission} n_{out} \frac{P_{beam}}{E_p} \quad (3.1)$$

여기서  $P$ 는 미임계로의 열 출력,  $P_{fission}$ 은 중성자 1개당 핵분열 에너지,  $P_{beam}$ 은 양성자 빔 출력,  $E_p$ 는 양성자 에너지를 나타낸다. 이때  $n_{out}$ 은 양성자원 1개당 원기둥 형태의 표적 옆면에서 빠져나오는 중성자 수이다.

식 (3.1)에 있는 중성자 1개당 핵분열 에너지  $P_{fission}$ 은 McCARD 계산을 통해 얻을 수 있다. 다음으로  $n_{out}$ 은 MCNP 6.2[10] 계산으로 구할 수 있다. 마지막으로 양성자 빔 출력  $P_{beam}$ 과 양성자 에너지  $E_p$ 은 가속기 사양에서 알 수 있다.

### 3.1.1. $n_{out}$ 계산 결과와 핵 파쇄 중성자 분포

앞서 언급했듯이,  $n_{out}$ 은 MCNP 6.2를 통해 구할 수 있다. 이때 원기둥 표적 옆면에서의 F1 tally 결과를  $n_{out}$ 이라고 결정하였다. MCNP 6.2 계산을 위한 기하구조는 그림 3.1에 나타내었다. 그림 3.1을 보면 알 수 있듯이, 납-비스무스 공융물 표적의 반경과 높이는 각각 7.53cm, 65cm이다. 또한, 양성자 빔은 표적 윗면에서 수직으로 입사하며, 이때 반경 방향 분포는 균일하다. 핵반응 단면적 라이브러리는 중성자는 ENDF/B-VII.1, 양성자는 la150h를 사용하였으며, 양성자원 수는 1,000,000개 이다.

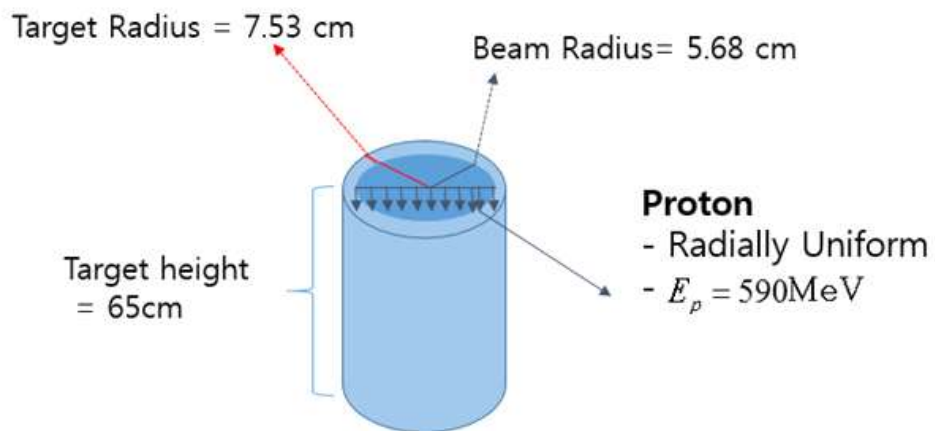


그림 3.1.  $n_{out}$  계산과 핵 파쇄 중성자 분포를 얻기 위한 MCNP 6.2 입력의 기하구조



계산 결과,  $n_{out}$ 은 9.47406 n/p로 나왔으며, 이 중성자들의 축 방향 분포, 높이 별 에너지 분포, 각 분포는 그림 3.2~그림 3.4에 나타내었다. 그림 3.2.을 보면, 축 방향 분포는 상단에서 약 7cm 아래에서 최대를 이루다 하단으로 갈수록 분포가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.3.에 도시한 높이 별 에너지 분포를 보면, 모든 분포가 약 1 MeV에서 최대가 됨을 알 수 있다. 또한, 하단으로 갈수록 수백 MeV 에너지 영역에서의 분포가 늘어나는 것도 확인할 수 있다. 파쇄 중성자들의 각 ( $\mu(\equiv \cos\theta)$ ) 분포는 표적 옆면의 법선 벡터를 기준으로 하여 얻었다. 각 분포는  $\mu$ 가 약 0.9일 때 최대를 이루며 이는 그림 3.4.에서 확인할 수 있다.

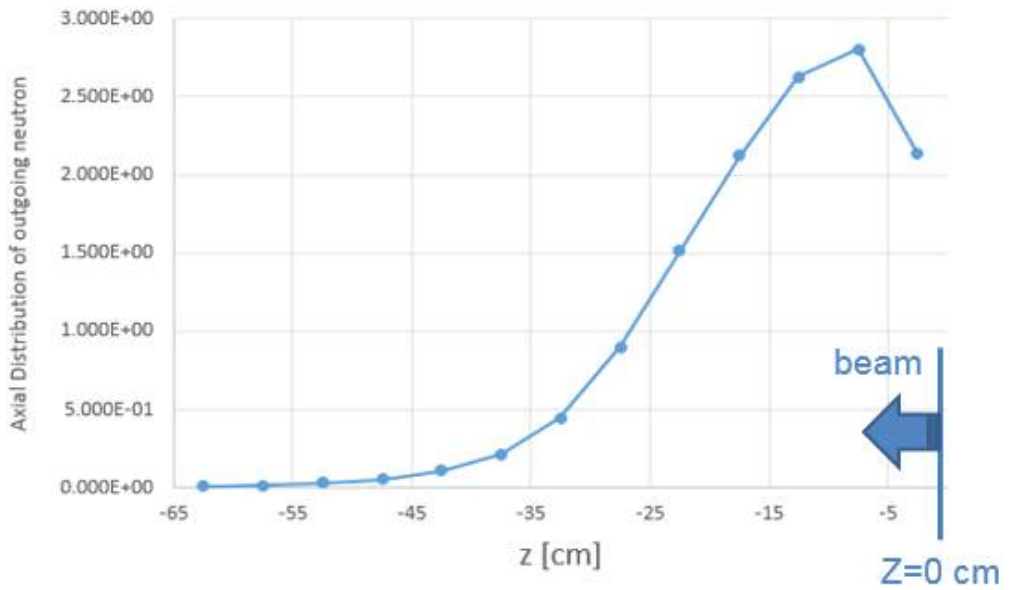


그림 3.2. 핵 파쇄 중성자의 축 방향 분포

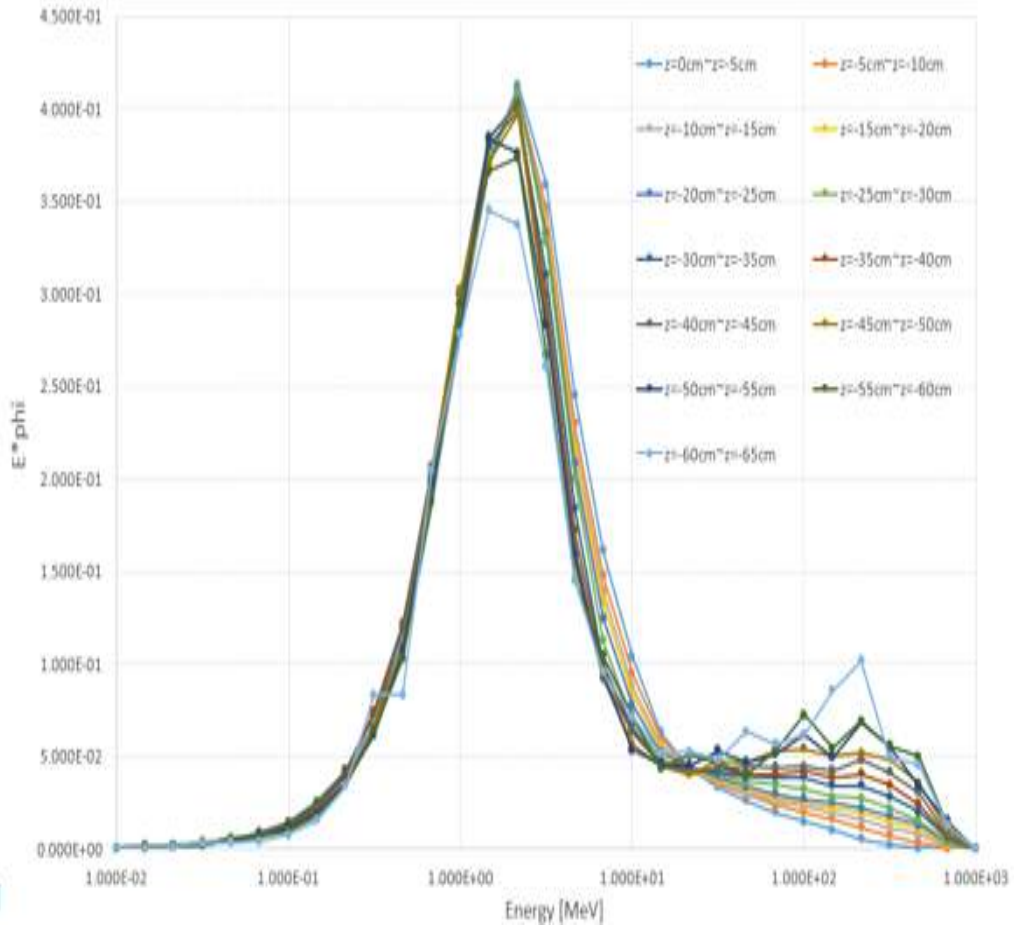


그림 3.3. 핵 파쇄 중성자의 높이 별 에너지 분포

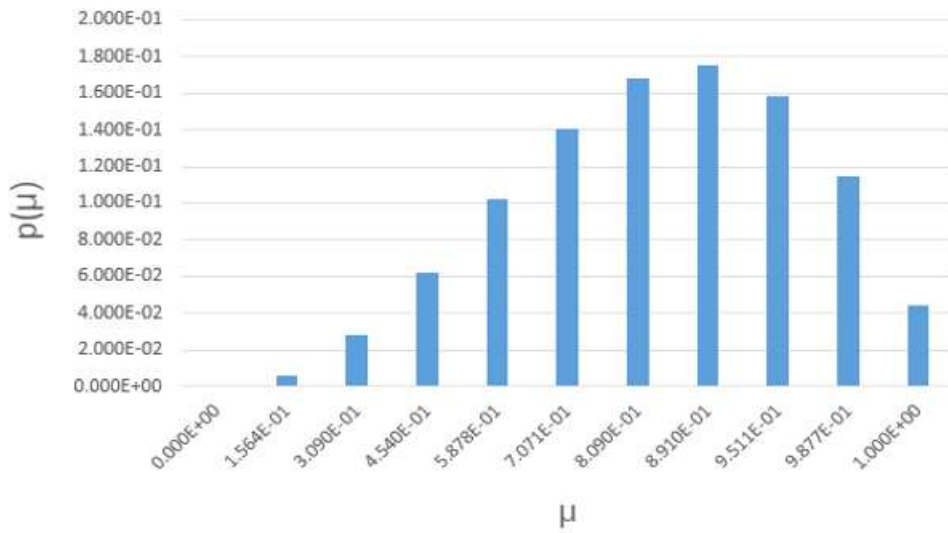


그림 3.4. 핵 파쇄 중성자의 각( $\mu$ ) 분포

### 3.1.2. 토륨과 초우라늄원소의 질량비 결정

중성자 1개당 핵분열 에너지인  $P_{fission}$  을 구하기 위해, 토륨과 초우라늄원소 질량비를 결정하였다. 질량비는 초기 유효증배계수( $k_{eff}$ )가 0.99에 가장 가까운 경우를 선택하였다. 유효증배계수는 McCARD의 임계도 계산 모드로 구하였으며, 사용된 핵반응 단면적 라이브러리는 ENDF/B-VII.1이다. 주기 당 히스토리 수는 20,000개이며, 활성 주기와 비활성 주기는 각각 400회와 100회이다. 결정된 토륨과 초우라늄원소의 질량비는 0.632:0.368이며, 이는 표 3.1.에서 확인할 수 있다.

표 3.1. 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수

Th	TRU	$k_{eff}$	(STD)
0.630	0.370	0.99330	0.00020
0.632	0.368	0.98991	0.00019
0.633	0.367	0.98776	0.00019
0.635	0.365	0.98386	0.00018

### 3.1.3. $P_{fission}$ 계산 결과

3.1.1.과 3.1.2.에서 구한 핵 과쇄 중성자 분포와 토륨과 초우라늄원소 질량비를 가지고 중성자 1개당 핵분열 에너지  $P_{fission}$  을 구하였다. 이는 McCARD의 고정 선원 계산 모드로 구하였으며, 이때 사용된 중성자원의 수와 라이브러리는 각각 100,000개, ENDF/B-VI.1이다. 표 3.2.에는 중성자 1개당 핵분열 에너지인  $P_{fission}$  계산 결과를 나타내었다.

표 3.2.  $P_{fission}$  계산 결과

Parameter	Value
$P_{fission}$	$1.30546 \times 10^4$ MeV/neutron

### 3.1.4. 열 출력 계산 결과

앞서 구한 중성자 1개당 핵분열 에너지  $P_{fission}$  과  $n_{out}$ , 양성자 에너지  $E_p$  을 가지고 열 출력을 계산하였다. 이때, 원자로 운전 시 열 출력이 일정하게 유지되면서, 요구되는 빔 출력 변화가 무시할 수 있을 정도로 작다는 전제로 계산을 하였다. 식 (3.1) 을 보면, 빔 출력인  $P_{beam}$  이 클수록 열 출력이 커진다. 또한, 열 출력이 클수록 핵변환이 더 많이 일어나는 것을 고려하면, 빔 출력은 최대로 하여 운전해야 함을 알 수 있다.

표 3.3.에는 앞서 구한 중성자 1개당 핵분열 에너지  $P_{fission}$  과  $n_{out}$ , 최대 빔 출력  $P_{beam}$ , 양성자 에너지  $E_p$  를 식 (3.1) 에 대입하여 구한 열 출력  $P$  를 나타내었다.

표 3.3.  $P$  계산 결과와  $P_{fission}$ ,  $n_{out}$ ,  $P_{beam}$ ,  $E_p$

Parameter	Value
$P$	377.329 MWth
$P_{fission}$	$1.30546 \times 10^4$ MeV/neutron
$n_{out}$	9.47406 neutrons/proton
$P_{beam}$	1.8 MW
$E_p$	590 MeV

## 제 4 장. 노심 형상 결정

### 제 1 절. 개요

2장에서 설계된 노심이 3장에서 계산된 열 출력인 377.329 MWth을 유지할 수 있는지를 살펴보아야 한다. 본 절에서는 빔 출력 변화 측면과 냉각 가능 여부 측면에서 이를 살펴볼 것이다.

우선, 빔 출력 변화 측면에서 살펴보자. 실제로, 식 (3.1) 내 중성자 1개당 핵분열 에너지  $P_{fission}$ 은 핵연료가 연소함에 따라 줄어들게 된다. 따라서 열 출력을 일정하게 하려면  $P_{fission}$ 가 줄어드는 만큼 양성자 빔 출력  $P_{beam}$ 을 늘려주어야 한다. 즉, 요구되는 빔 출력 변화가 작다는 것은  $P_{fission}$ 의 변화가 작다는 것을 의미한다. 하지만,  $P_{fission}$ 의 변화량이 무시할 수 있을 정도로 작을 것인지는 미지수다.

만약,  $P_{fission}$ 의 변화량이 실제로 연소함에 따라 작지 않다고 해보자. 이 경우에는 빔 출력인  $P_{beam}$ 을 더 증가시킬 수 있을지에 대한 여부를 살펴보아야 한다. 하지만, 3장에서 계산된 열 출력은 가속기의 최대 빔 출력으로 계산된 것이기에 더 늘리는 것은 가능하지 않다.

다음으로, 냉각 가능 여부를 살펴보자. 이는 주어진 형상에서 냉각재 온도는 500°C, 유속은 2m/s를 넘지 않게[11] 하는 최대 열 출력을 구함으로써 알 수 있다. 위 조건을 만족하는 최대 열 출력을 구해보면 59.3737 MWth이며, 따라서 냉각도 가능하지 않음을 알 수 있다.

이에 본 장에서는, 냉각이 가능하고, 1년 동안 최소의 빔 출력으로 최



대의 초우라늄원소 핵 변환율과 U-233 증식률을 달성하는 형상을 도출하는 것을 목적으로 한다.

## 제 2 절. 대상 노심 형상

대상 노심의 핵연료 형태와 반경 방향 단면도는 그림 4.1에 나타내었다. 대상 노심은 기존 노심( Case 1 ), 내부 12개의 집합체에 이산화 토륨이 장전된 노심( Case 2 ), 내부 30개의 집합체에 이산화 토륨이 장전된 노심( Case 3 ) 총 3가지이다. 내부에 이산화 토륨이 장전된 경우도 외곽 집합체 내 토륨과 초우라늄원소의 질량비를 초기 유효증배계수가 약 0.99가 되게끔 조정해주었다. 유효증배계수 계산 시, McCARD 임계도 계산 모드로 구하였다. 이때 사용된 핵반응 단면적 라이브러리는 ENDF/B-VII.1이고, 주기 당 히스토리 수는 20,000개, 활성 주기와 비활성 주기는 각각 400회와 100회이다. 이에 결정된 질량비는 Case 2)는 0.586:0.414, Case 3)은 0.516:0.484이고, 표 4.1.과 표 4.2.에서 확인할 수 있다.

표 4.1. 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수  
( Case 2 )

Th	TRU	$k_{eff}$	(STD)
0.585	0.415	0.99108	(0.00019)
0.586	0.414	0.98932	(0.00019)
0.587	0.413	0.98772	(0.00019)
0.589	0.411	0.98453	(0.00021)
0.590	0.410	0.98300	(0.00018)

표 4.2. 토륨과 초우라늄원소의 질량비에 따른 유효증배계수  
( Case 3 )

Th	TRU	$k_{eff}$	(STD)
0.515	0.485	0.99121	(0.00021)
0.516	0.484	0.98975	(0.00021)
0.517	0.483	0.98853	(0.00020)
0.519	0.481	0.98561	(0.00021)
0.520	0.480	0.98394	(0.00020)

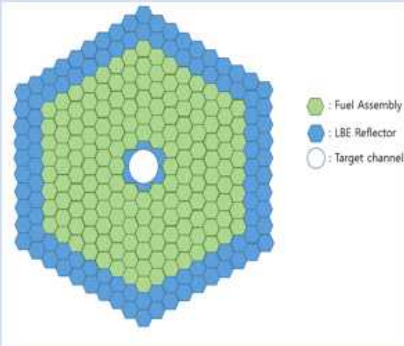
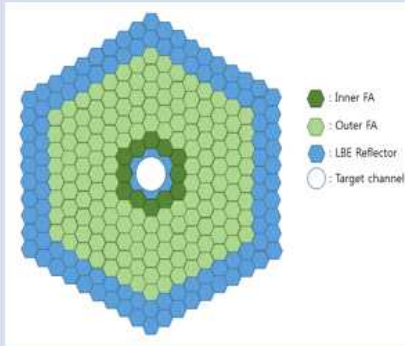
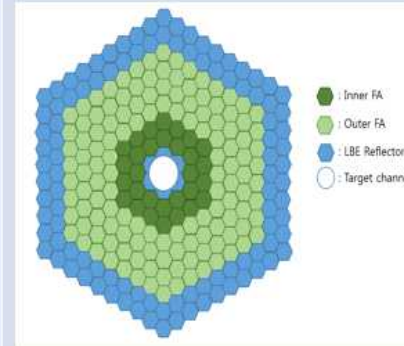
	Case 1)	Case 2)	Case 3)
Core Configuration	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: green;">●</span> : Fuel Assembly</li> <li><span style="color: blue;">●</span> : LBE Reflector</li> <li><span style="color: white;">○</span> : Target channel</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: darkgreen;">●</span> : Inner FA</li> <li><span style="color: lightgreen;">●</span> : Outer FA</li> <li><span style="color: blue;">●</span> : LBE Reflector</li> <li><span style="color: white;">○</span> : Target channel</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: darkgreen;">●</span> : Inner FA</li> <li><span style="color: lightgreen;">●</span> : Outer FA</li> <li><span style="color: blue;">●</span> : LBE Reflector</li> <li><span style="color: white;">○</span> : Target channel</li> </ul>
Fuel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>(\text{Th-TRU})\text{O}_2</math></li> <li>- Mass Ratio of <u>Th:TRU</u> is 0.632:0.368</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inner FA : <math>\text{ThO}_2</math></li> <li>• Outer FA : <math>(\text{Th-TRU})\text{O}_2</math></li> <li>- Mass Ratio of <u>Th:TRU</u> is 0.586:0.414</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inner FA : <math>\text{ThO}_2</math></li> <li>• Outer FA : <math>(\text{Th-TRU})\text{O}_2</math></li> <li>- Mass Ratio of <u>Th:TRU</u> is 0.516:0.484</li> </ul>

그림 4.1. 대상 노심들의 반경 방향 단면도와 핵연료 형태

### 제 3 절. 유효증배계수 및 출력 분포 변화

대상 노심들이 1년 동안 연소하면서 출력 분포와 유효증배계수가 어떻게 변하는지를 살펴보았다. 모든 경우에 대하여 McCARD 고정 선원 모드로 100,000개의 중성자원, ENDF/B-VII.1 라이브러리를 가지고 계산을 하였다. 열 출력 역시 모든 경우에 대해 59.3737 MWth로 고정해 주었다. 다만, 유효증배계수는 McCARD 임계도 계산 모드로 구하였다. 사용된 라이브러리는 ENDF/B-VII.1, 주기 당 히스토리 수는 20,000개, 활성 주기와 비활성 주기는 각각 400회와 100회이다.

대상 노심들의 1년 동안의 유효증배계수 변화는 그림 4.2.에 나타내었다. 그림을 보면, 유효증배계수가 Case 1)에서는 약 1,600 pcm, Case 2)에서는 약 1,700 pcm, Case 3)에서는 약 1,800 pcm 만큼 감소함을 확인할 수 있다.

그림 4.3.은 대상 노심들의 주기 초(BOC), 주기 중(MOC), 주기 말(EOC)에서의 축 방향 출력 분포를 나타낸 것이다. 모든 경우 중심에서 약 7cm 아래에서 축 방향 출력이 최대가 됨을 확인할 수 있다. 이는 핵 파쇄 표적이 유효노심 하부에 존재하기 때문에 발생한 것으로 볼 수 있다.

대상 노심들의 주기 초, 주기 중, 주기 말에서의 반경 방향 출력 분포는 그림 4.4.에 나타내었다. 모든 경우에서 초우라늄원소가 장전된 집합체 중 중심에 가장 가까운 집합체에서 최대 출력이 나옴을 알 수 있다. 또한, Case 1)에서는 최댓값이 1.53에서 1.59로, Case 2)에서는 최댓값이 1.44에서 1.48로, Case 3)에서는 최댓값이 1.50에서 1.51로 변하는 것도 확인할 수 있다.

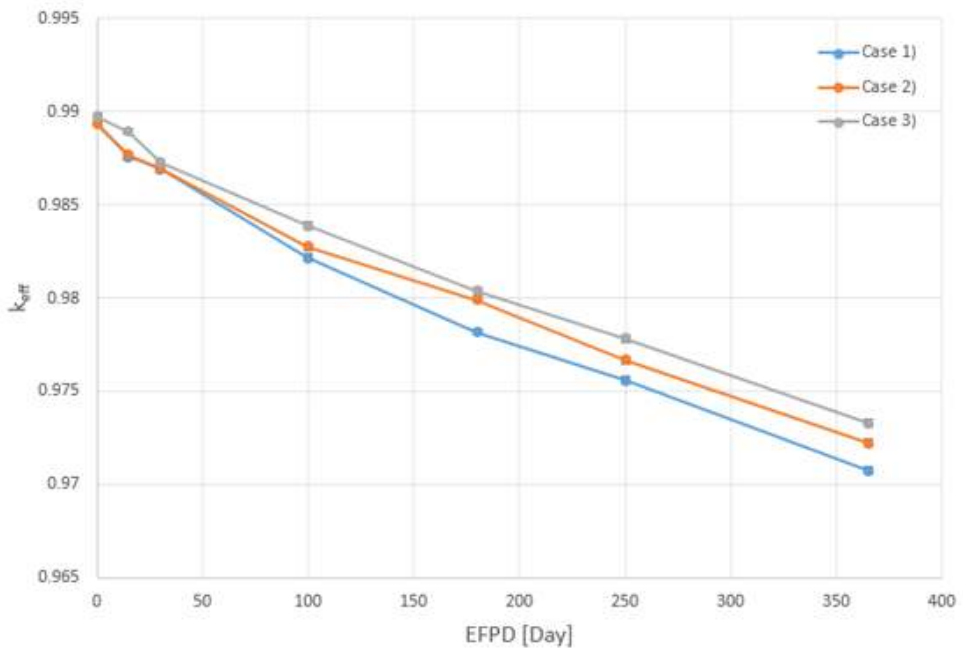


그림 4.2. 대상 노심들의 1년 동안의 유효증배계수 변화

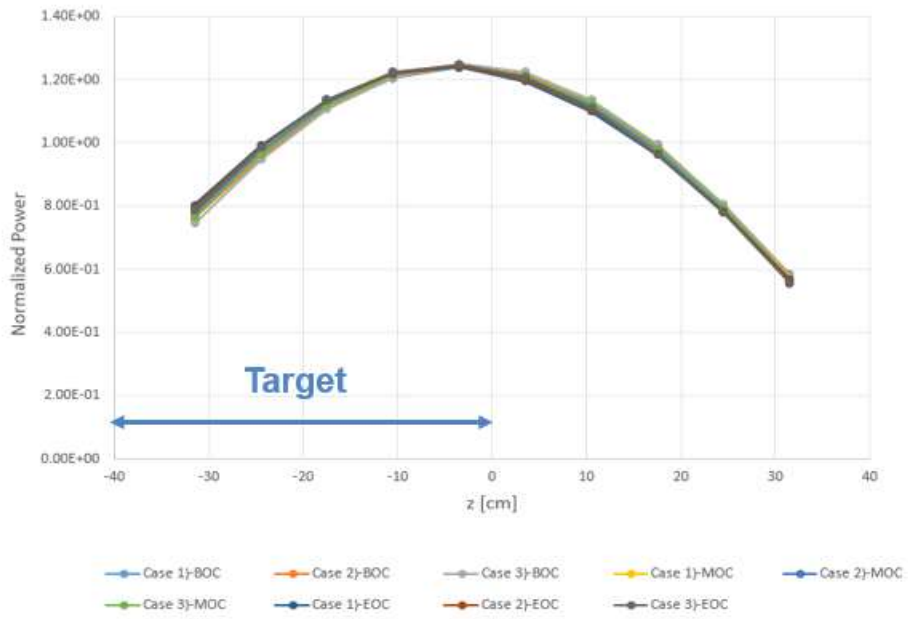
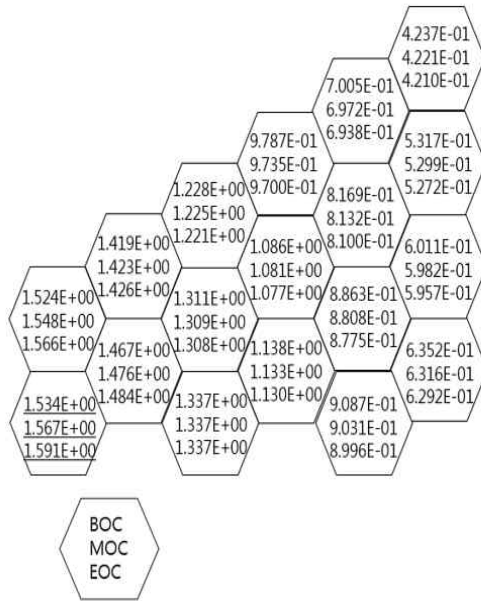


그림 4.3. 대상 노심들의 주기 초, 주기 중, 주기 말에서의 축 방향 출력 분포

✓ Case 1)



## 제 4 절. 핵 변환율과 U-233 증식률

### 4.4.1. 핵 변환율

핵 변환율(Transmutation Ratio,  $TR$ )은 장전된 초우라늄원소 질량 대비 핵변환이 일어난 초우라늄원소 질량을 의미한다. 식 (4.1) 은 이를 식으로 나타낸 것이다.

$$TR \equiv \frac{|\Delta M_{TRU}|}{M_{TRU}(t=0)} \quad (4.1)$$

여기서  $M_{TRU}(t=0)$ 은 장전된 초우라늄원소 질량,  $\Delta M_{TRU}$ 은 핵변환이 일어난 초우라늄원소 질량을 의미한다. 대상 노심들의 장전된 초우라늄원소 질량과 핵 변환율 계산 결과는 표 4.3.에 나타내었다. 표 4.3.을 보면 Case 1)이 핵 변환율이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

표 4.3. 대상 노심들의 장전된 초우라늄원소 질량과 핵 변환율 계산 결과

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
$M_{TRU}(t=0)$ [kg]	583.775	611.722	635.100
$TR$ [%]	3.3353	3.1923	3.0897



#### 4.4.2. U-233 증식률

U-233 증식률(Breeding Ratio,  $BR$ )은 장전된 토륨 질량 대비 생성된 U-233 질량을 의미한다. 식 (4.2) 는 이를 식으로 나타낸 것이다.

$$BR \equiv \frac{\Delta M_{92}^{233}U}{M_{90}^{232}Th}(t=0) \quad (4.2)$$

여기서  $M_{90}^{232}Th(t=0)$ 은 장전된 토륨 질량,  $\Delta M_{92}^{233}U$ 은 생성된 U-233 질량을 의미한다. 대상 노심들의 장전된 토륨 질량과 U-233 증식률 계산 결과는 표 4.4.에 나타내었다. 표 4.4.를 보면 Case 1)이 U-233 증식률이 가장 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

표 4.4. 대상 노심들의 장전된 토륨 질량과 U-233 증식률 계산 결과

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
$M_{90}^{232}Th(t=0)$ [kg]	1289.64	1258.105	1231.736
$BR$ [%]	0.6773	0.6710	0.6618

## 제 5 절. 요구 빔 출력

대상 노심들의 주기 초, 주기 중, 주기 말에서 요구되는 빔 출력을 계산하였다. 이는 식 (1.1) 에서 빔 출력 항인  $P_{beam}$  에 대해 정리하면 구할 수 있으며, 식 (4.3) 과 같다.

$$P_{beam} = P \frac{E_p}{P_{fission} n_{out}} \quad (4.3)$$

노심 별 주기 초, 주기 중, 주기 말에서 요구되는 빔 출력 계산 결과는 표 4.5.에 나타내었다. 이를 살펴보면, 모든 노심이 주기 말로 갈수록 요구 빔 출력이 더 커짐을 알 수 있다. 또한, 대상 노심 모두 주기 초, 주기 중, 주기 말에서 요구되는 빔 출력이 가속기의 최대 빔 출력인 1.8 MW를 넘지 않음을 확인할 수 있다.

표 4.5. 대상 노심들의 주기 초~주기 말 요구 빔 출력 계산 결과 [MW]

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
BOC	0.3010	0.3764	0.4317
MOC	0.6263	0.7256	0.8724
EOC	0.8918	0.9927	1.1567

## 제 6 절. 성능지수

1절에서 기술된 요건을 가장 잘 만족하는 형상을 결정하기 위해 성능지수(Performance Index,  $PI$ )를 도입하였다. 이 값은 핵 변환율( $TR$ )과 U-233 증식률( $BR$ )이 클수록, 주기 말 요구 빔 출력( $P_{beam,EOC}$ )이 낮을수록 크게 나오며, 식 (4.4) 와 같다.

$$PI \equiv \frac{TR \times BR}{P_{beam,EOC}} \quad (4.4)$$

노심 별 성능지수 계산 결과는 표 4.6.에 기술하였으며, Case 1)이 가장 큰 성능지수를 가짐을 확인할 수 있다.

표 4.6. 대상 노심들의 성능지수 계산 결과 [ %×%/MW ]

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
$PI$	2.5330	2.1579	1.7678

## 제 5 장. 안전 변수 계산

### 제 1 절. 개요

그림 4.1.에서 나타낸 3가지 대상 노심의 주기 초와 주기 중, 주기 말의 안전 변수를 계산하였다. 계산한 안전 변수는 유효 지발중성자 분율( $\beta_{eff}$ ), 냉각재 보이드 가(Coolant Void Worth,  $\Delta\rho$ )와 도플러 반응도 계수( $K_D$ )이다.

### 제 2 절. 계산 결과

표 5.1.~표 5.3.에는 각각 대상 노심들의 주기 초~주기 말의 유효 지발중성자 분율, 냉각재 보이드 가, 도플러 반응도 계수 계산 결과를 나타내었다. 이때 모든 경우에 대하여 McCARD 고정 선원 모드로 계산하였다. 사용한 중성자원 수는 100,000개, 사용한 핵반응 단면적 라이브러리는 ENDF/B-VII.1이다. 열 출력 역시 모든 경우에 대해 59.3737 MWth로 고정해 주었다. 다만, 유효증배계수는 McCARD 임계도 계산 모드로 구하였다. 이 경우, 사용된 라이브러리는 ENDF/B-VII.1, 주기 당 히스토리 수는 20,000개, 활성 주기와 비활성 주기는 각각 400회와 100회이다.

냉각재 보이드가와 도플러 반응도 계수[12]는 각각 식 (5.1), 식 (5.2)와 같이 계산하였다.

$$\Delta\rho = \rho_{50\%} - \rho_{0\%} \quad (5.1)$$

$$K_D = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\ln(T_2/T_1)} \quad (5.2)$$

여기서  $\rho_{50\%}$ 은 유효노심 내 냉각재 보이드 분율이 50%일 때의 반응도,  $\rho_{0\%}$ 은 유효노심 내 냉각재 보이드 분율이 0%일 때의 반응도,  $\rho_1$ 은 핵연료 온도( $T_1$ )가 300K일 때의 반응도,  $\rho_2$ 은 핵연료 온도( $T_2$ )가 600K일 때의 반응도이다.

표 5.1.을 보면, 주기 중을 제외하고는 Case 1)에서 유효 지발중성자 분율이 가장 높게 나왔음을 알 수 있다. 또한, 주기 초~주기 말에서 Case 3)의 유효 지발중성자 분율이 가장 낮게 나옴을 확인할 수 있다. 이는 장전된 토륨과 초우라늄원소의 질량의 차이에서 기인한 것으로 생각할 수 있다. 표 4.3.을 보면 장전된 초우라늄원소가 Case 1)이 가장 적고, Case 3)이 가장 많다. 또한, 표 4.4.를 보면 장전된 토륨이 Case 1)이 가장 많고, Case 3)이 가장 적다. 즉, Case 1)의 경우, 토륨 장전량이 가장 많고, 초우라늄원소 장전량이 가장 적기에 유효 지발중성자 분율이 주기 중을 제외하고 가장 높게 나온 것이다. 한편, Case 3)의 경우, 토륨 장전량이 가장 적고, 초우라늄원소 장전량이 가장 많기에 유효 지발중성자 분율이 가장 낮게 나온 것이라고 볼 수 있다.

표 5.2.를 살펴보면, 대상 노심 모두 주기 초~주기 말에서 음의 냉각재 보이드 가를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 냉각재 보이드 가의 절댓값이 Case 1)에서 가장 크게 나오는 것도 확인할 수 있다. 이는 다음과 같이 생각해 볼 수 있다. 모든 경우, 냉각재 내 보이드 발생으로 중성

자 스펙트럼이 경화가 된다. 이에 중성자 누설과 고속 핵분열이 증가하지만, 중성자 누설 증가 영향이 더 크기에 음의 냉각재 보이드 가를 갖는다. 다만, Case 1)은 다른 경우보다 중성자의 누설 증가 영향이 상대적으로 더 크기에 절댓값이 가장 크게 발생한 것이다.

표 5.3.에 나타낸 도플러 반응도 계수들을 살펴보면, 대상 노심 모두가 주기 초~주기 말에서 음의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한, 도플러 반응도 계수의 절댓값을 살펴보면, 주기 초에서는 Case 3)에서, 이 외에서는 Case 2)에서 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 도플러 확장으로 인한 중성자 포획 반응 증가의 영향과 핵분열 반응 증가의 영향의 차이에 따라 발생한 것으로 볼 수 있다. 즉, 주기 초에서는 Case 3)이 포획 반응 증가의 영향이 가장 크고, 주기 중~주기 말에서는 Case 2)의 경우가 포획 반응의 영향이 가장 크기에 절댓값이 가장 크게 나타난 것이다.

표 5.1. 대상 노심들의 주기 초~주기 말 유효 지발증성자 분율

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
BOC	$3.09677 \times 10^{-3}$	$3.09229 \times 10^{-3}$	$3.03346 \times 10^{-3}$
MOC	$2.98736 \times 10^{-3}$	$2.99829 \times 10^{-3}$	$2.95876 \times 10^{-3}$
EOC	$2.97779 \times 10^{-3}$	$2.80187 \times 10^{-3}$	$2.78563 \times 10^{-3}$

표 5.2. 대상 노심들의 주기 초~주기 말 냉각재 보이드 가 [pcm]

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
BOC	-2,345	-2,086	-1,998
MOC	-2,302	-2,150	-1,983
EOC	-2,435	-2,159	-2,058

표 5.3. 대상 노심들의 주기 초~주기 말 도플러 반응도 계수 [pcm]

	Case 1)	Case 2)	Case 3)
BOC	-52	-46	-55
MOC	-6	-281	-32
EOC	-161	-223	-116

## 제 6 장. 결론

본 연구에서는 몬테카를로 코드인 McCARD를 이용하여 최소의 빔 출력으로 최대의 핵변환과 U-233 증식을 이루는 토륨 장전 미임계 원자로 노심을 설계하였다. 이때 미임계로 노심과 결합한 가속기는 동일 에너지 당 건설비용이 상대적으로 저렴한 사이클로트론이다.

핵연료 집합체와 반사체 집합체는 한 변의 길이가 4.35cm인 육각형 모형이며, 각각 162개와 102개가 장전되었다. 유효노심 높이는 70cm이다. 장전된 핵연료 형태는  $(Th-TRU)O_2$ 이며, 토륨과 초우라늄원소의 질량비는 초기 유효증배계수가 0.99에 가장 가까운 0.632:0.368로 결정하였다. 여기서 초우라늄원소 조성은 PWR에서 45,000 MWD/MTU 연소도로 방출된 후, 10년 냉각을 거쳐 PyroGreen 공정을 거친 후의 조성이다. 핵 파쇄 표적은 원통형이며, 반경과 높이는 각각 5.68cm, 65cm이다. 양성자 가속기는 SINQ 사이클로트론을 선정하였으며, 최대 빔 출력과 양성자 에너지는 각각 1.8 MW, 590 MeV이다.

MCNP 6.2와 McCARD를 통해 미임계로의 열 출력을 계산하였다. 이 방법은 가속기 출력과 양성자 에너지, 핵 파쇄 표적 옆면에서 누설되는 양성자원 1개당 중성자 수, 중성자 1개당 핵분열 에너지를 이용하여 구한다. 이때 가속기 출력과 양성자 에너지는 가속기 사양에서 얻었다. 표적에서 빠져나오는 양성자원 1개당 중성자 수와 이들의 분포는 MCNP 6.2 계산을 통해 구하였다. 중성자 1개당 핵분열 에너지는 McCARD 계산으로 얻었다. 이때 적용된 전제조건은 '운전 시 열 출력이 일정하게 유지', '요구되는 빔 출력 변화가 무시할 수 있을 정도로 작음', '최대 빔 출력으로 운전'이다. 이 방법을 통해 계산된 열 출력은 377.329 MWth이



었다.

1년 동안 냉각이 가능하고, 요구되는 빔 출력이 최소이자, 최대의 핵 변환 성능과 U-233 증식 성능을 갖는 형상을 결정하였다. 우선, 주어진 형상에서 냉각이 가능한 최대 열 출력을 계산하였다. 냉각재인 납-비스무스 공융물의 최대 유속과 최대 온도가 각각 2 m/s와 500 °C를 초과하지 않게 하는 최대 열 출력은 59.3737 MWth 이었다. 다음으로 각 대상 노심들이 59.3737 MWth의 열 출력을 유지한다는 전제하에 1년 동안 연소계산을 수행하였다. 대상 노심은 기존 노심, 내부 12개의 집합체에 이산화 토륨이 장전된 노심, 내부 30개의 집합체에 이산화 토륨이 장전된 노심 총 3가지이다. 내부에 이산화 토륨이 장전된 경우, 외곽 집합체 내 토륨과 초우라늄원소의 질량비를 다시 조정해주었다. 이는 초기 유효증배계수가 0.99가 되게끔 하기 위함이다. 성능지수를 도입하여 형상 결정을 해주었다. 성능지수는 핵 변환율과 U-233 증식률을 주기 말 요구 빔 출력으로 나뉜 값으로 정의한다. 성능지수 계산 결과, 기존 노심이 성능지수가 가장 크게 나왔다.

또한, 대상 노심들의 유효 지발중성자 분율, 냉각재 보이드 가, 도플러 반응도 계수를 계산해 보았다. 계산 결과, 주기 중을 제외하고는 기존 노심에서 유효 지발중성자 분율이 가장 높게 나왔다. 냉각재 보이드 가 계산 결과, 대상 노심들이 주기 초~주기 말에서 모두 음의 값을 가지며, 기존 노심에서 절댓값이 가장 큰 것을 확인하였다. 도플러 반응도 계수의 경우, 대상 노심들이 주기 초~주기 말에서 모두 음의 값을 가짐을 확인하였다. 도플러 반응도 계수의 절댓값의 경우, 주기 초를 제외하면 내부 12개의 집합체에 이산화 토륨이 장전된 노심에서 가장 큰 값이 나왔다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. W. Noh, "Technical Review on Thorium Breeding Cycle", Journal of Energy Engineering, Vol. 25, No. 2, pp.52-64, 2016 (In Korean).
- [2] J. W. Kim et al., "How to Burn Nuclear Wastes - The Accelerator driven Subcritical Thorium Reactor", PHYSICS AND HIGH TECHNOLOGY, pp.36-42, 2015. 3 (In Korean).
- [3] M. J. Song et al., "Technical development trends and promotion plan for thorium reactors", 2014, Korea Energy Economics Institute (In Korean).
- [4] Graicianyde Paula Barros et al. "Study of an ADS Loaded with Thorium and Reprocessed Fuel", Science and Technology of Nuclear Installations, 2012.
- [5] Thanh Mai Vu et al. "Transmutation Strategy Using Thorium-Reprocessed Fuel ADS for Future Reactors in Vietnam", Science and Technology of Nuclear Installations, 2013.
- [6] Thanh Mai Vu et al. "Seed and blanket ADS using thorium - reprocessed fuel: Parametric survey on TRU transmutation performance and safety characteristics", Annals of Nuclear Energy, Vol 78 (2015).
- [7] W. S. Park et al., "HYPER (Hybrid Power Extraction Reactor): A system for clean nuclear energy", Nuclear Engineering and Design, Vol. 199, Issue 1-2, June 2000.

- [8] H. J. Shim et al., "McCARD: A Monte Carlo Code for Advanced Reactor Design and Analysis, Nuclear Engineering and Technology", 44, 2, 161-176, 2012.
- [9] I. H. Hahm, "Safety Assessment of PyroGreenWaste Disposal Operation in Underground Intermediate Level Radioactive Waste Repository", M.S. Thesis, Seoul National University (2017).
- [10] MCNP User's manual, Code Version 6.2, 2017.
- [11] C. H. Cho et al., "The Introduction of an Injection Tube for the Device of the Flow Rate Reduction at the Lead-Bismuth Spallation Target", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2003 (In Korean).
- [12] P. Darnowskiet al., "Minor actinides impact on basic safety parameters of medium-sized sodium-cooled fast reactor", NUKLEONIKA 2015;60(1):171-179, doi: 10.1515/nuka-2015-0034.

## 부록 A. 집합체 개수 결정

TORIA[3]의 핵연료 집합체 및 반사체 집합체 개수는 각각 176개와 116개이다. 이때 핵연료 집합체와 표적 채널이 포함된 육각형 환(ring)의 개수는 식 (A.1)의 방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$3n(n+1)+1-7=176 \quad (\text{A.1})$$

$$\therefore [n]=7$$

반사체 집합체도 포함된 육각형 환의 개수는 식 (A.2)의 방정식의 해를 구해 알 수 있다.

$$3n(n+1)-3 \times 7 \times 8 - 1 = 116 \quad (\text{A.2})$$

$$\therefore [n]=9$$

부록 B.  $p_{pin}$ ,  $p_{assembly}$ ,  $l$  계산

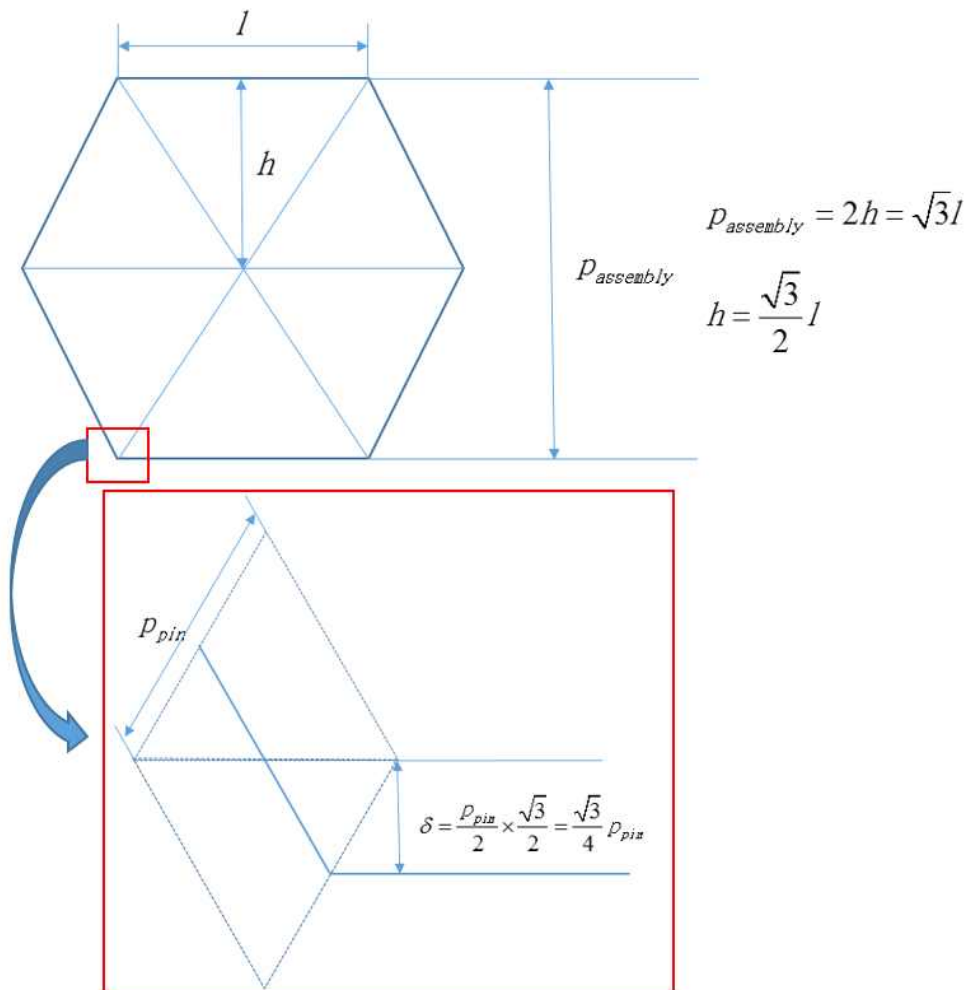


그림 B.1.  $p_{pin}$ ,  $p_{assembly}$ ,  $l$ 의 관계 도식

핵연료봉 간 간격인  $p_{pin}$ 는 (B.1)과 같이 계산된다.

$$p_{pin} = (p/d) \times 2 \times r_f = 1.5 \times 2 \times 0.322 \text{ cm} = 0.97 \text{ cm} \quad (\text{B.1})$$

여기서  $(p/d)$ 은 P/D(Pitch-to-Diameter)이며,  $r_f$ 는 핵연료봉 반경이다.

다음으로, 집합체 간 간격인  $p_{assembly}$ 은 식 (B.2)와 같이 계산된다.

$$p_{assembly} = 2 \left( \delta + N_{pinlayer} \frac{\sqrt{3}}{2} p_{pin} \right) \quad (\text{B.2})$$

$\delta$ 는 집합체 내 최외곽 핵연료봉 중심과 집합체 한 변과의 거리이고,  $N_{pinlayer}$ 은 집합체 내 핵연료봉 환의 개수로 여기서는 4이다.  $\delta$ 은 식 (B.3)과 같이 계산되며, 이를 식 (B.2)에 대입하면 식 (B.4)와 같이 나온다.

$$\delta = \frac{p_{pin}}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} p_{pin} \quad (\text{B.3})$$

$$p_{assembly} = \frac{\sqrt{3}}{2} p_{pin} (1 + 2N_{pinlayer}) \quad (\text{B.4})$$

식 (B.4)에 핵연료봉 간 간격인  $p_{pin}$ 와  $N_{pinlayer}$ 을 대입하면, 집합체 간 간격인  $p_{assembly}$ 는 다음과 같이 나옴을 알 수 있다.

$$p_{assembly} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.97\text{cm} \times (1 + 2 \times 4) = 7.53\text{cm} \quad (\text{B.5})$$

집합체 한 변의 길이인  $l$ 과 집합체 간 간격인  $p_{assembly}$ 은 식 (B.6)과 같은 관계가 있으므로, 집합체 한 변의 길이인  $l$ 은 (B.7)과 같이 나오게 된다.

$$l = \frac{p_{assembly}}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.6})$$

$$l = \frac{7.53\text{cm}}{\sqrt{3}} = 4.35\text{cm} \quad (\text{B.7})$$

## 부록 C. 빔 영역의 수평 및 수직 방향 단면도

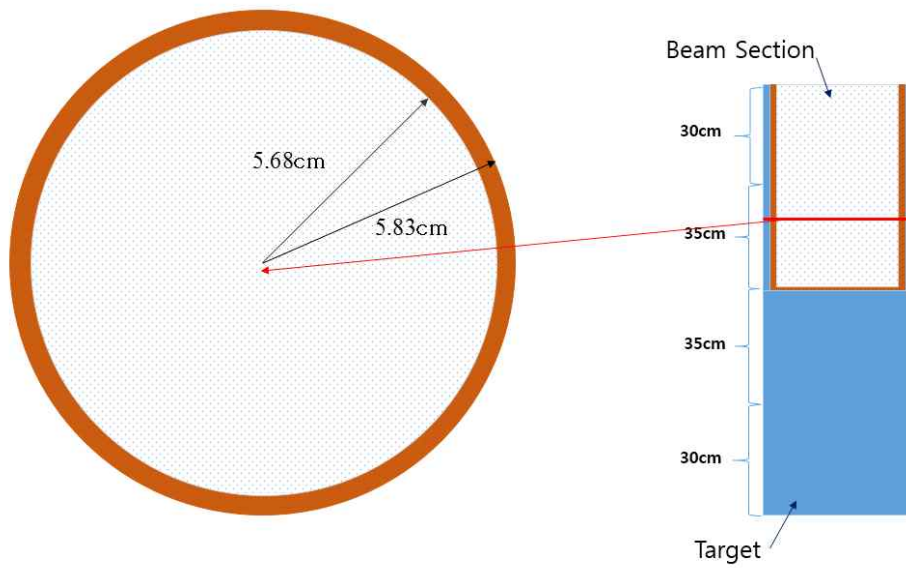


그림 C.1. 빔 영역의 수평(왼쪽) 및 수직(오른쪽) 방향 단면도



## 부록 D. 냉각이 가능한 최대 열 출력 계산

핵연료봉 내 선형 열 발생률은 식 (D.1)과 같으며, 열 균형 방정식은 식 (D.2)와 같이 쓸 수 있다.

$$q'(z) = q'_{\max} \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad (\text{D.1})$$

$$\dot{m} \frac{dh}{dz} = q'(z) = q'_{\max} \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad (\text{D.2})$$

여기서  $L$ 은 핵연료봉의 높이,  $\dot{m}$ 은 냉각재 질량 유속,  $h$ 는 엔탈피를 의미한다. 이때, 냉각재를 비압축성이라 가정하면, 식 (D.2) 내의  $dh$ 는  $dh = c_p dT_c$ 와 같이 나타낼 수 있다. 식 (D.2)에 이를 대입한 후,  $z=0$ 에서  $z=L$ 까지 적분을 해주면 식 (D.3)과 같다.

$$\int_{T_{c,bottom}}^{T_{c,top}} dT_c = \int_0^L dz \left[ \left( \frac{q'_{\max}}{\dot{m}c_p} \right) \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \right] \quad (\text{D.3})$$

$$\Delta T_c = T_{c,top} - T_{c,bottom} = 2 \left( \frac{q'_{\max}}{\dot{m}c_p} \frac{L}{\pi} \right)$$

$\Delta T_c$ 의 범위가 정해져 있고,  $q'_{\max}$ 를 제외한 나머지 변수들은 고정되어 있다. 따라서  $\Delta T_c$ 가 최대일 때의  $q'_{\max}$ 를 계산하면 된다. 이를 계산한 결과는 식 (D.4)에 나타내었다.

$$(\dot{q}'_{\max})_{\max} = \frac{(\Delta T_c)_{\max} \dot{m} c_p \pi}{2L} \quad (\text{D.4})$$

또한, 평균 선형 열 발생률을  $\bar{q}'$ 이라고 하면,  $\bar{q}'$ 는 식 (D.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{q}' = \frac{1}{L} \int_0^L dz q'(z) = \frac{2}{\pi} \dot{q}'_{\max} \quad (\text{D.5})$$

평균 출력밀도를  $\bar{q}'''$ 이라고 하면, 평균 선형 열 발생률과의 관계는 식 (D.6)과 같으며, 식 (D.5)와 연립을 하면 식 (D.7)을 유도할 수 있다. 이때  $r_f^2$ 는 핵연료 반경이다.

$$\bar{q}' = \bar{q}''' \pi r_f^2 \quad (\text{D.6})$$

$$\dot{q}'_{\max} = \bar{q}''' \frac{\pi^2 r_f^2}{2} \quad (\text{D.7})$$

식 (D.7)에 식 (D.4)를 대입하면 식 (D.8)과 같다.

$$\bar{q}''' = \frac{\dot{m} c_p (\Delta T_c)_{\max}}{\pi r_f^2 L} \quad (\text{D.8})$$

표 D.1.에 제시된 각종 데이터를 식 (D.8)에 대입한 후, 이를 핵연료봉 전체 부피에 곱해주면, 냉각이 가능한 최대 열 출력을 구할 수 있다. 계

산 결과는 식 (D.9)에 나타내었다. 여기서  $N$ 은 핵연료봉의 갯수이다.

$$P_{\max} = \overline{q'''} N \pi r_f^2 L = 59.3737 \text{ MWth} \quad (\text{D.9})$$

표 D.1. 냉각이 가능한 최대 열 출력 계산에 필요한 각종 데이터

Parameter	Value	Parameter	Value
$\dot{m}$	0.1034 kg/sec	$c_p$	125.69 J/kgK
$r_f$	0.322 cm	$L$	70 cm
$(\Delta T_c)_{\max}$	470 K	$N$	9,720