

미임계 핵변환 시스템 HYPER - 단위핵연료 집합체 연소특성

Burnup Characteristics of an Unit Assembly in the Subcritical  
Transmutation System HYPER

정종성, 김창효

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

박원석

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)시스템은 가속기 미임계 시스템으로서 사용후 핵연료에 내재한 장수명 핵종들을 소각 또는 핵변환 시키는데 주목적을 가지고 있다. 본 논문에서는 본격적인 노심분석에 앞서서 단위격자 계산을 통하여 HYPER시스템 노심의 기본적인 특성을 고찰하여 보았다. TRU 핵종의 소멸 또는 연소가 진행됨에 따라 노심 반응도는 거의 선형적으로 감소하였고, 초기 장전량이 작은 Pu-238, Pu-240, Am-243, Cm-244 등은 오히려 그 농도가 증가하는 양상을 보였다. 노심의 출력분포는 매우 평탄할 것으로 예측되었으며 전체적으로 반응도 계수는 양의 값을 가질 것으로 예측되었다.

Abstract

An accelerator driven subcritical system named HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) is being designed in Korea Atomic Energy Research Institute for the incineration of nuclear waste. The core characteristics of HYPER system was tried to be inferred throughout an unit assembly calculation. The reactivity was decreased almost linearly and the concentration of nuclide having small initial loading such as Pu-238, Pu-240, Am-243, Cm-244 was increased as TRU incinerates. HYPER system was expected to have very flat power distribution and positive reactivity coefficient.

## 1. 개요

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)시스템은 가속기 미임계 시스템으로서 사용후 핵연료에 내재한 장수명 핵종들을 소각 또는 핵변환 시키는데 주목적을 가지고 있다. HYPER시스템이 목표로 하고 있는 기능은 1000MW(th) 출력을 가지면서 연간 약 380kg의 TRU를 소각시키는 것이다. 현재 설정된 주요 설계 요건을 보면, 미임계도는 0.97, 중성자 특성은 고속중성자로 하며 냉각재는 Pb-Bi 액체금속을 사용하게 되어 있다[1]. 노심 설계의 핵심이 안전성에 있다고 할 때, 비록 HYPER시스템이 미임계 상태에서 운전이 수행된다고는 하지만 충분한 고유안전성을 확보하는 것이 바람직하다고 하겠다.

이에 본 논문에서는 단위핵연료 집합체 내의 TRU연료의 연소에 따른 핵종 소멸특성, 각 연료봉들의 출력분포, 그리고 기포계수의 변화를 바탕으로 핵연료 집합체의 연소특성 및 HYPER시스템의 안전성에 대해서 고찰하고자 한다.

## 2. 계산방법

설계된 핵연료 집합체의 연소에 따른 각 연료봉들의 출력분포와 TRU연료의 연소 특성 등을 분석하기 위해서 그림 1과 같이 1/12 대칭 핵연료 집합체를 모델링하였다. 그림 2는 집합체내 기본 격자 구조 사양을 나타내고 표 1은 핵연료봉의 핵종 구성비를 나타낸다[2]. 계산 시 모든 경계면에 대해서는 반사체 조건을 사용하였고 분석은 임계모드 계산방식을 취하였다.

계산을 위한 전산코드로서 MCNP-ORIGEN2 Coupling을 주로 이용하였다[3]. 그러나 통계 코드인 MCNP가 매우 작은 핵적변화에 대해서는 둔감하므로 반응도계수 평가와 같은 미세계산을 위해 모든 계산을 HELIOS(190군 단면적 사용)와 병행하였다[4]. 시스템의 온도는 300K로 가정하였고 이에 대응하는 핵자료를 사용하였다.

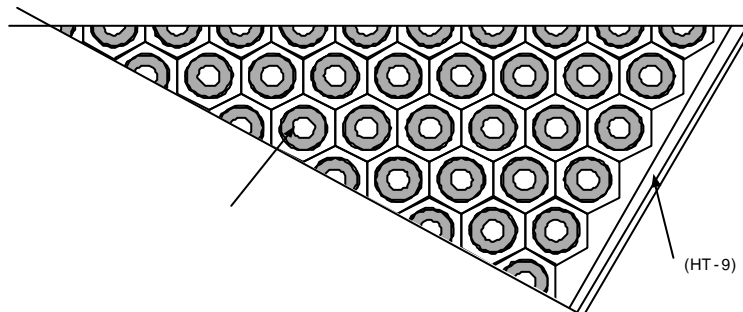


그림 1 1/12 핵연료 집합체 모델

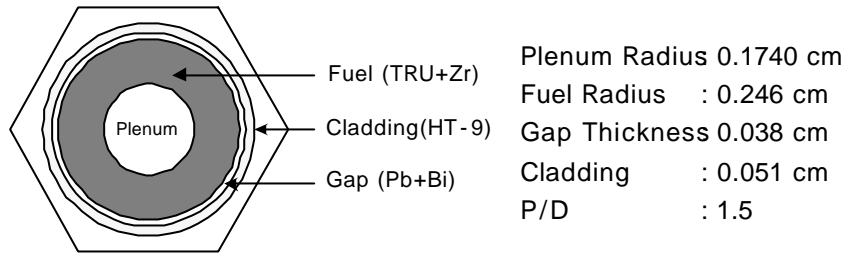


그림 2 단위격자 사양

표 1 핵연료봉 구성 핵종의 무게분율

Material	밀도(g/cc)	핵종	무게분율
TRU-Zr	6,85244	Np-237	0,02070
		Pu-238	0,00630
		Pu-239	0,23445
		Pu-240	0,10665
		Pu-241	0,03465
		Pu-242	0,02025
		Am-241	0,02250
		Am-243	0,00360
		Cm-244	0,00090
		Zr	0,55000
Pb-Bi	10,15500	Pb	0,54500
		Bi-209	0,45500
HT-9	7,91000	Fe	0,85011
		Cr	0,11991
		Mb	0,02998

### 3. 계산결과

#### 3.1 MCNP-ORIGEN2 Coupling과 HELIOS의 비교계산 결과

그림 2의 단위격자 모델을 이용하여 MCNP-ORIGEN2 Coupling과 HELIOS의 반응도 계산능력을 비교분석 하였다. 비교계산은 냉각재를 경수, 중수, 소듐, 납 등으로 바꿔가면서 무한증배계수의 변화를 비교했다. 그 결과 표 2에서 보듯이 MCNP가 모든 경우에 있어서 무한증배계수를 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 특히 두 코드간의 무한증배계수의 차이  $((MCNP-HELIOS) \times 10^5)$ 가 냉각재의 질량수가 증가할수록 커지는 경향을 보였다. MCNP는 많은 설계 계산에서 검증용 또는 실험 대체용으로 사용됨을 감안할 때, HELIOS는 중성자 스펙트럼이 경화될수록 결과의 불확실성이 커지는 것으로 예측된다.

표 2 MCNP-ORIGEN2 Coupling과 HELIOS의 비교 결과

Coolant	MCNP		HELIOS	차이
	Kinf	std		
Light Water	1,28381	0,00262	1,27835	546
Heavy Water	1,25765	0,00237	1,23643	2122
Na	1,47814	0,00206	1,43639	4175
Pb	1,68988	0,00179	1,59350	9638
Na,C,Al,Ti, Cr,Mn,Fe,Ni	1,30961	0,00179	1,27172	3789
Pb-Bi	1,71632	0,00194	1,65621	6011

### 3.2 반응도변화 특성

연소에 따른 집합체의 무한증배계수의 변화를 표 3과 그림 3에 나타내었다. HELIOS의 결과가 MCNP-ORIGEN2 Coupling에 비해 낮은 무한증배계수를 예측하고 있다. 이것은 HELIOS가 경수로 스펙트럼을 바탕으로 만들어진 코드이기 때문으로 여겨진다.(3.1 비교계산 참조) 보편적으로 연소에 따른 무한증배계수는 초기 핵분열 생성물의 증가와 함께 급작스레 감소하거나 이후 fertile에 의한 fissile의 생성으로 약간 증가하는 경향을 보이거나 HYPER의 경우 그림 3에서처럼 매우 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이것은 고속중성자 시스템의 경우 증배율이 핵분열 생성물 농도에는 둔감하고 가연성 Fissile의 농도에 민감함을 나타낸다고 할 수 있다.

표 3 연소에 따른 무한증배계수 변화

Burnup (Days)	MCNP		HELIOS
	Kinf	std	
0	1,58692	0,00279	1,46320
1	1,58212	0,00208	1,46278
2	1,57909	0,00260	1,46237
3	1,57956	0,00278	1,46196
5	1,57661	0,00253	1,46110
10	1,57607	0,00229	1,45896
20	1,57654	0,00253	1,45463
50	1,55917	0,00256	1,44155
100	1,53753	0,00293	1,41962
200	1,49332	0,00223	1,37484
300	1,43898	0,00198	1,32872

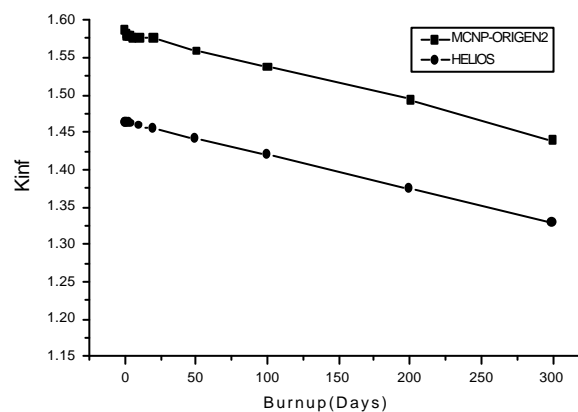


그림 3 K-inf vs Burnup

### 3.3 핵종변환 특성

연소에 따른 TRU의 변화량은 그림 4에 나타내었다. 두 코드 모두 동일한 TRU 감소 추이를 보여주고 있다. 그리고 TRU내의 각 핵종들의 변화량은 그림 5~그림 13과 같다. Np-237, Pu-239, Pu-241, Am-241은 연소에 따라 선형적으로 감소함을 볼 수 있는데, Pu-238, Pu-240, Pu-242, Am-243, Cm-244는 연소에 따라 오히려 증가하고 있다. 이것은 대체로 짝수의 질량수를 가지는 TRU 핵종들은 전체적으로 TRU 양이 감소함에도 불구하고 포획에 의해 증가한다고 할 수 있다. 그리고 그림에서 보듯이, 일부 TRU 핵종의 경우 두 코드 사이에 상당한 차이를 보이고 있다. 전체적으로 보면 MCNP-ORIGEN Coupling의 결과가 HELIOS보다 더 많이 감소하고 더 많이 축적됨을 알 수 있다. 이는 MCNP-ORIGEN2 Coupling의 포획단면적이 HELIOS보다 더 크기 때문으로 보인다.

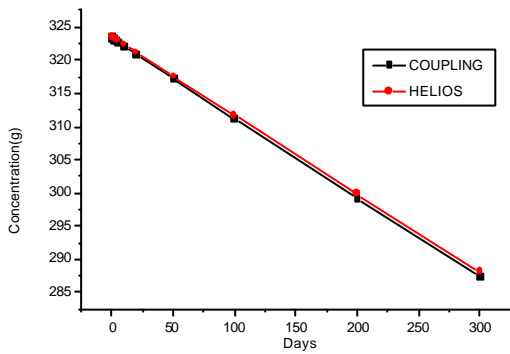


그림 4 연소에 따른 TRU 변화량

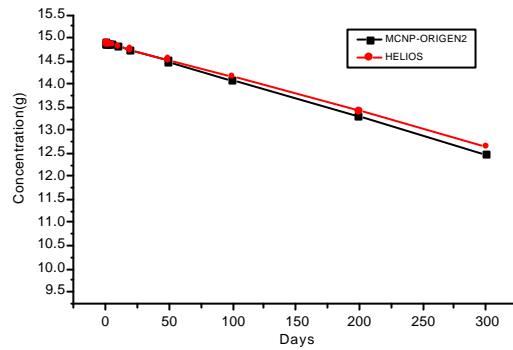


그림 5 Np-237 변화량

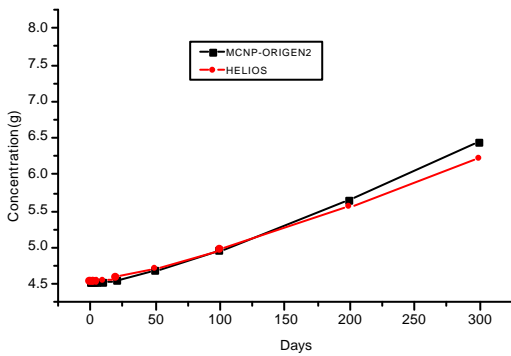


그림 6 Pu-238 변화량

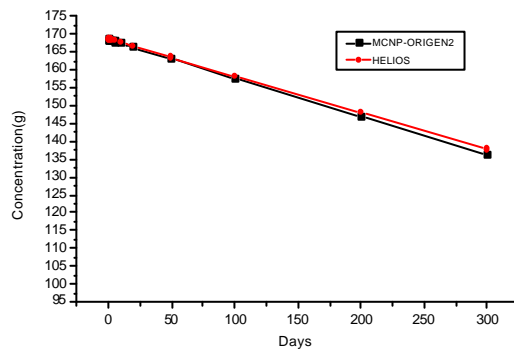


그림 7 Pu-239 변화량

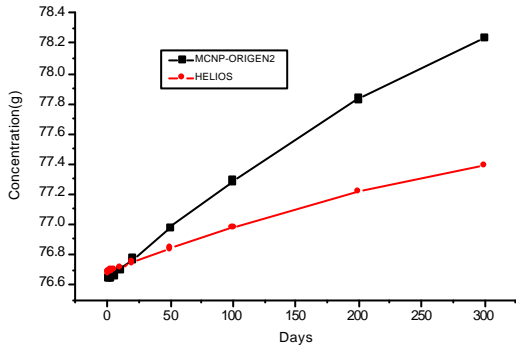


그림 8 Pu-240 변화량

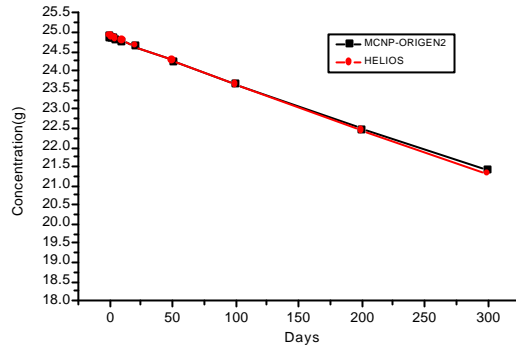


그림 9 Pu-241 변화량

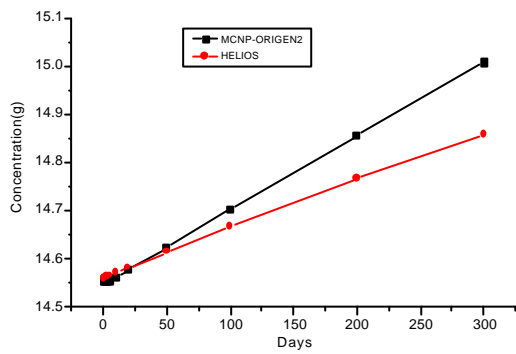


그림 10 Pu-242 변화량

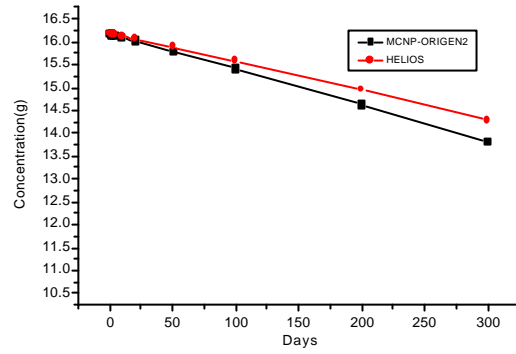


그림 11 Am-241 변화량

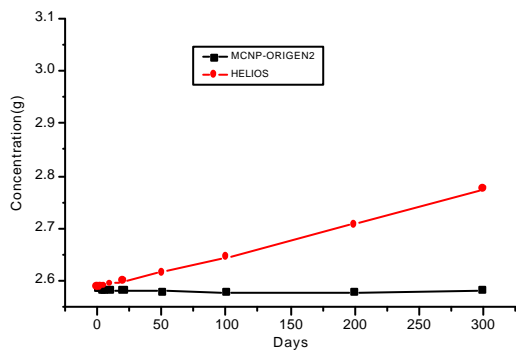


그림 12 Am-243 변화량

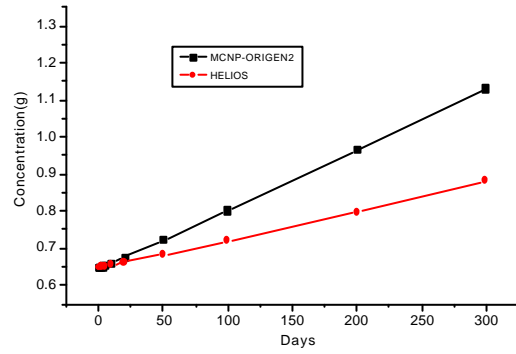


그림 13 Cm-244 변화량

### 3.4 출력분포 특성

집합체의 초기 상태 봉출력은 표 4와 같다, 그리고 그림 14는 집합체 연소에 따른 집합체내 침투 출력의 변화를 보여주고 있다. 표 4와 그림 14에서 볼 수 있듯이 HYPER시스템의 경우 집합체내

봉출력 분포가 매우 평탄화되어 있음을 알 수 있다. 비록 MCNP-ORIGEN2 Coupling의 경우 연소에 따라 집합체내 첨두출력이 약간 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 양이 10%를 넘지 않은 것으로 크게 우려할 사항은 아닌 것으로 보인다.

표 4 초기상태 상대 봉출력 분포

1.005	0.996	0.993	0.994	0.997	0.998	1.002	0.999	0.997	1.001	1.002
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	1.000	1.000	0.997	1.001	1.004	0.996	1.001	1.005	1.001	
	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
		0.998	0.997	1.001	1.002	1.001	1.003	1.002		
		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
			0.998	1.001	1.002	1.000	1.000	1.003		
			1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
							0.998	1.000	1.005	
							1.000	1.000	1.000	
										1.003
										1.001

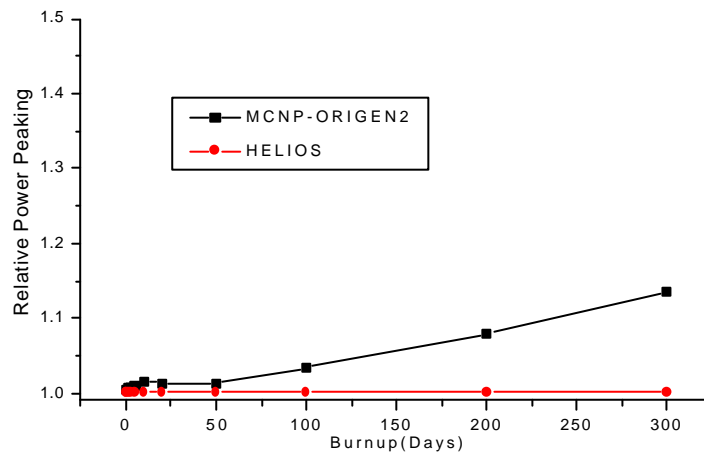


그림 14 연소에 따른 첨두출력변화

### 3.5 기포계수 특성

연소에 따른 기포계수의 변화는 표 5와 그림 15와 같다. 기포계수는 냉각재의 밀도가 100%, 90%인 상태에서 각각의 무한증배계수를 계산하여 산출하였다(90%-100%). 단위 집합체 기포계수는 양의 값을 나타내며 그림 15에서 보듯이 연소가 진행되는 동안 거의 변화가 없음을 볼 수가 있다.

표 5 기포계수의 변화

Burnup (Days)	기포계수 ( $\Delta K_{inf}/k/\%$ )	
	Coupling	HELIOS
0	0,00152	0,00217
1	0,00179	0,00218
2	0,00181	0,00217
3	0,00232	0,00217
5	0,00230	0,00217
10	0,00195	0,00217
20	0,00140	0,00217
50	0,00199	0,00217
100	0,00171	0,00217
200	0,00170	0,00216
300	0,00213	0,00214

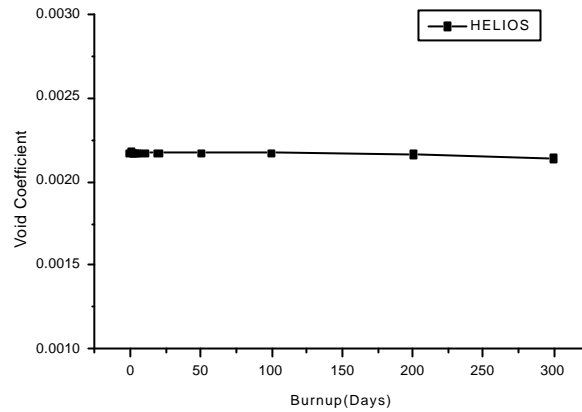


그림 15 연소에 따른 기포계수의 변화

#### 4 결론

장수명 방사성 핵종인 TRU의 소멸은 핵분열 반응을 통해서만 이루어진다. 따라서 HYPER시스템에서 연소 또는 소멸되는 TRU양은 시스템의 출력에 비례한다. 그림 16은 단위 집합체에서 연소에 따른 핵종량의 변화를 소멸되는 총 TRU양에 대한 상대값으로 나타낸 것이다. 특정 TRU핵종의 농도변화는 다음과 같은 방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{dn_i}{dt} = n_{i-1}\sigma_{i-1}^c\phi + \sum_{j \neq i} n_j\lambda_j - n_i\lambda_i - n_i\sigma_i^f\phi \quad \text{-----}(1)$$

수식 (1)에서 우측 첫 번째 항은 중성자 포획반응에 의한 생성을 그리고 두 번째 항은 방사성 붕괴에 의한 생성을 나타낸다. 예측할 수 있는 바와 같이 핵분열 단면적이 비교적 크고 초기 장전량이 많은 Np-237, Pu-239와 같은 핵종은 상당량 감소한 데 반해, 핵분열 단면적이 작고 그 초기 장전량이 작은 Pu-238과 같은 핵종은 다른 핵종의 포획에 의한 유입량이 커서 오히려 증가하는 경향을 보인다. 핵변환 시스템은 재순환 핵연료 주기를 기본 핵주기로 하고 있다. 따라서 주기가 증가하면 차츰 Pu-238과 같은 핵종은 그 농도가 증가할 것이다. 그리고 일정 시점에 이르면 식 (1)의 소멸항이 증가할 것이고 그 결과 포화핵종 농도에 도달할 것으로 예측된다.

HYPER 단위집합체 내의 상대 붕출력은 일반 경수로가 1.3~1.4 정도인데 반해, 1.15 이하로서 매우 평탄함을 볼 수가 있었는데, 이것은 고속중성자의 평균자유행정거리(mean free path)가 열중성자보다 크고, 모델링에 있어 모든 경계에 대한 반사체 조건을 준 결과로 보여진다. 그러나 실제 HYPER 시스템은 외부선원에 의해서 운전되므로 임계운전상태에 비해 출력분포 기울기가 보다 심화될 것이다.



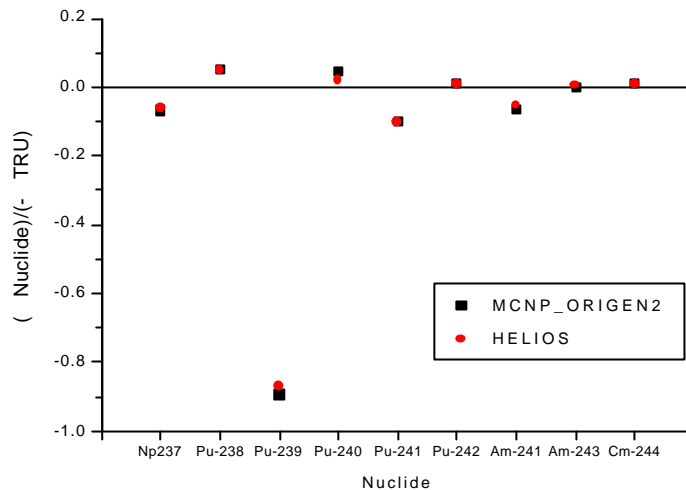


그림 16 핵종별 상대적 농도 변화

노심의 고유 안전성과 관련하여 반응도계수는 매우 중요한 역할을 한다. HYPER 시스템은 U-238이 전무하기 때문에 도플러 효과에 의한 음의 핵연료 반응도계수는 거의 없다고 생각된다. 냉각재에 기포가 생성되면 다음과 같은 3가지의 핵적 변화가 발생한다.

- 중성자 스펙트럼 경화에 의한 누수율 증가 [음의 반응도 효과에 기여]
- 스펙트럼 경화에 의한 포획반응 단면적 감소 [양의 반응도 효과에 기여]
- 스펙트럼 경화에 의한 핵분열 단면적 증가 [양의 반응도 효과에 기여]

따라서 음의 기포계수를 유지하기 위해서는 기포발생 시 첫 번째 변화인 누수율 증가가 매우 커야 한다. 본 논문에서 평가된 단위 집합체 기포계수는 무한(infinite) 시스템에 대한 것으로 누수율을 전혀 고려하지 않았다. 따라서 기포계수가 양의 값을 갖는다. HYPER 시스템 전체에 대한 기포계수를 평가하기 위해서는 추후 full core 모델에 기초하여 보다 상세한 계산이 요구된다.

## 감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 수행하고 있는 중장기 연구사업의 일환으로 수행된 것입니다.

## 참고문헌

- [1] Won S. Park, etc., "HYPER - A System for Clean Nuclear Energy", Nuclear Engineering and Design, to be published.
- [2] 박원석외 4인 "HYPER 시스템 설계연구", KAERI/TR-1316/99
- [3] 신희성외 5인 "LCS-ORIGEN2 연결프로그램 개발 및 활용", 춘계원자력 학술회의, 1998
- [4] HELIOS user's manual (August 01, 1998)