

임계 및 미임계 TRU 핵변환 노심의 핵특성 비교 평가

A Comparison of Core Characteristics between Critical and Subcritical System for TRU Transmutation

김 용 남, 한 치 영, 김 종 경

한양대학교

서울 성동구 행당동 17

박 원 석, 김 용 희

한국원자력연구소

대전 유성구 덕진동 150

요 약

현재 세계 각국에서 연구 또는 개발 중인 핵변환로 개념은 기존의 임계 원자로를 이용하는 방법과 가속기 미임계로를 이용하는 방법 두 부류로 나눌 수 있다. 두 개념은 서로 상반되는 장, 단점을 지니고 있다. 이와 관련하여 본 논문에서는 임계 및 미임계 노심을 모델링하여 두 노심 간 핵특성, 특히 안전특성에 대하여 상호 비교 평가를 수행하였다. 아울러 미임계 노심의 특징인 외부 중성자원이 노심 핵특성에 미치는 영향과 임계 노심에서의 중성자 흡수체 역할에 대한 평가를 병행하였다. 평가 인자로는 중성자 에너지 스펙트럼 등의 기초 핵특성 인자를 비롯하여 핵연료 온도 계수, 냉각재 밀도계수 등의 동특성 변수들을 고려하였다. 얻어진 계산 결과들을 토대로 핵변환 노심 설계와 관련한 몇 가지 결론을 도출하였다.

ABSTRACT

Currently, two concepts of TRU transmutation systems, the critical and the subcritical, are under development in many countries and organization. These two have their own dis- and advantages. In this context, this study has performed the comparative analyses of nuclear characteristics between two concepts. At the same time, the neutronic impacts of the external source and the neutron absorber on the core characteristics have been also analyzed for the subcritical and the critical system, respectively. The neutron flux spectrum, the fuel temperature coefficient, and the coolant density coefficient have been considered for comparative analyses. Based on the obtained results, some conclusions could be derived with relation to TRU transmuter design.

1. 서론

현재 세계 각국에서 연구 또는 개발 중인 핵변환 기술의 주류는 기존의 임계 원자로를 이용하는 방법과 가속기 미임계로를 이용하는 방법, 즉 임계 개념과 미임계 개념의 두 가지로 나눌 수 있다. 임계 개념의 시스템 제어는 반응도 제어에 의한 방식인 반면 미임계 개념은 가속기 빔 출력 제어에 의해 시스템이 제어되는 방식이다. 이들 상이한 제어 방식과 관련하여 두 개념의 핵변환로는 핵변환 효율성 뿐만 아니라 연소 특성 및 안전 특성 등 노심 핵특성이 크게 달라진다.

두 개념은 서로 상반되는 장, 단점을 지니고 있다. 임계 개념은 무엇보다도 우선 현재 축적된 검증 기술과 경험을 많이 확보하고 있어 기술적 우위에 있으며 미임계 개념에서 추가로 요구되는 가속기 출력에 소요되는 비용을 절감할 수 있는 장점도 포함하고 있다. 반면 과거 체르노빌이나 TMI 사고와 같은 임계 사고 가능성을 원론적으로 내포하고 있어 대중적 우려가 되고 있다는 것이 큰 단점 중의 하나이다. 미임계로는 시스템 자체가 음의 반응도 즉 미임계 상태에서 운전되므로 운전의 유연성이나 핵연료 장전 탄력성 그리고 관련 핵종분리 방법의 비핵확산성 등의 측면에서도 기존의 임계로보다는 유리할 것으로 여겨진다.

이와 관련하여 본 논문에서는 현재 한국원자력연구소에서 연구, 개발 중인 미임계 핵변환로인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) 노심의 설계사양[1]을 근간으로 임계 및 미임계 노심을 모델링하여 두 노심 간 핵특성, 특히 안전 특성에 대하여 상호 비교 평가를 수행하였다.

2. 평가 방법 및 노심 구성

2.1 평가 방법

미임계로는 본질적으로 음의 반응도, 즉 미임계 상태에서 가속기 빔의 핵파쇄 반응으로부터 외부 중성자원을 공급 받아 정상상태를 유지하는 개념이다. 노심의 기하학적 구조나 핵연료 형태 및 장전 방식 등의 동일 조건에서 임계를 유지해야 하는 임계로 개념과 비교할 때 장전되는 핵연료의 농축도는 미임계도 만큼 낮아 지게 된다. 이러한 관점에서 본 연구는 임계 및 미임계 노심 간 기초 핵특성 비교로부터 출발하였다.

초우란 핵종(TRU)을 소멸시키려는 목적의 핵변환로에 장전되는 핵연료는 핵원료성(fertile) 물질을 거의 포함하고 있지 않다. 그러므로 고전환비의 일반 고속증식로와는 달리 핵연료 연소에 따른 반응도 감손이 상당하다. 미임계로의 경우, 핵파쇄 중성자원의 공급으로 일정 기간 반응도 감손을 감수한 채 운전할 수 있는 개념이나 임계로의 경우는 반응도 감손을 보상해 주는 방법이 반드시 필요하다. 반응도 감손을 보상하기 위한 방법으로 주기초 잉여반응도 확보와 운전 중 핵연료 교체 등을 들 수 있겠으나 핵연료주기 관리 등의 효율성 측면에서 전자의 방법을 우선적으로 고려함이 타당하다고 보아진다. 임계로의 주기초 잉여반응도를 억제하기 위한 방법으로, B_4C 형태의 중성자 흡수체를 집합체 형태로 장전, 운용하는 KALIMER(Korea Advanced Liquid MEtal Reactor) 노심의 제어봉 구동장치[2]와 유사한 방법을 채택하였다. 장전된 B_4C 물질은 열중성자를 흡수하여

잉여반응도를 억제함과 동시에 시스템 스펙트럼을 경화 시키는 역할을 한다. 미임계 노심의 외부 중성자원 또한 핵분열 중성자보다 훨씬 경화된 스펙트럼을 띠는 것이 일반적인 고려 사항이다. 이들 중성자 흡수체와 외부 중성자원은 임계 및 미임계 시스템 각각의 스펙트럼에 간섭하여 제반 노심 특성에 적지 않은 영향을 줄 것으로 사료된다.

이와 관련하여 본 연구에서는 앞서 언급한 바의 주기초 반응도 차이에서 기인한 두 개념 간의 근본적인 핵특성 차이를 상호 비교 분석함과 더불어 미임계 노심의 특징인 외부 중성자원의 노심 핵특성에 미치는 영향과 임계 노심에서의 중성자 흡수체 역할을 평가하는데 초점을 두고 다음의 네 가지 경우에 대하여 노심계산을 수행하였다.

- CRSARO : Critical Reactor System, All Control Rod Out
- CRSCRI : Critical Reactor System, Control Rod Insertion
- ADSEIG : Accelerator Driven Subcritical System, Eigen Mode Calculation (Without External Source)
- ADSSRC : Accelerator Driven Subcritical System, Source Mode Calculation (With External Source)

물론 두 개념 간 상호 비교는 각 개념에 부합하는 핵종분리 방법 등 관련된 핵주기 정책과 핵변환 효율성, 그리고 경제성 평가 등을 종합하여 평가되어야 하겠지만 최우선적으로 그 안전성 확보 여부에 초점이 맞춰져야 한다고 여겨진다. 따라서 중성자 에너지 스펙트럼 및 유효 미시핵단면적 등의 기초 핵특성 인자를 비롯하여 핵연료 온도계수, 냉각재 밀도계수 등의 동특성 변수들을 비교 분석하였다.

모든 계산은 KALIMER 노심 설계용 전산코드 체계인 K-CORE 시스템을 이용, 수행하였다. 사용된 핵단면적 라이브러리인 KAFAX/F22[3]는 JEF-2.2를 토대로 생성된 중성자 80군, 광자 24군 핵자료집이다. 미임계 노심 계산 시 노심 중앙의 표적 물질로부터의 외부 중성자원의 스펙트럼에 대한 자료는 OECD/NEA가 핵파쇄 반응을 모사하는 HETC 코드의 PSI Version으로 계산한 값[4]을 그대로 사용하였다. 모든 노심계산에 DIF3D 전산코드[5]의 육각형 셀을 다루는 hex-z 옵션을 사용하였다. 그런 이유로 외부선원의 반경방향분포는 실린더 형태의 현실적 모델을 구현하지 못하고 노심 중앙 7개의 핵연료집합체 셀에 균일 분포하는 등방성 선원으로 근사하였다. 한편, 노심 중앙 상부에 양성자 빔이 입사하는 진공영역 등의 특이 영역은 DIF3D 전산 코드의 확산 근사 방법론 적용의 오차를 유발할 가능성이 있다[6]. 이를 보정하기 위하여 진공영역에 그 하부 표적 영역의 물질을 1/10 밀도로 추가로 삽입하여 계산하였다.

2.2 평가 노심 구성

임계 및 미임계 비교 평가 대상 노심을 구성함에 있어 제어 방식의 상이함 이외의 다른 인자로 인한 비교타당성 저해 요인을 배제하기 위하여 가급적 동일 환경을 구축하고자 하였다. 두 노심의 출력은 모두 HYPER 노심의 1000 MW_{th}로 설정하였으며 노심의 기하학적 구조는 동일하게 HYPER 노심의 설계자료를 근간으로 하였다. 다만 미임계 노심의 경우 노심 중앙 상부에는 가속기 빔이 입사하는 진공영역을, 그리고 그 하부인 노심 중앙에는 외부 중성자 원을 모사하였고, 반면 임계 노심에서는 주기초 잉여반응도를 억제하기 위한 제어봉 집합체를 방사 대칭형으로 삽입하였다. 두 노심의 반경방향 구성을 그림 1에 도시하였고 상이한 주요 설계인자를 표 1에 비교 수록하였다. 노심의

유효높이(active height)는 120 cm로 설정하였으며 노심의 상, 하부에 위치하는 반사체의 두께는 120cm로 가정하였다. 핵연료집합체의 duct pitch는 19.96 cm, 핵연료봉의 P/D (Pitch -to- Diameter)는 1.5, 핵연료의 Smear Density는 75%로 하였다. 냉각재 및 반사체는 모두 Pb-Bi 액체금속을 사용, 냉각 개념도 동일하게 하였다.

핵연료의 화학적 형태나 장전 방식 또한 두 노심 모두 동일하게 하였다. TRU(35,000 MWD/MTU)의 PWR 사용후핵연료를 10년 동안 냉각한 후 핵종분리에 의해 회수된 TRU)와 Zr)으로만 구성된 금속 연료형태를 취하였으며 두 노심 모두 전 영역에 균일하게 장전하였다. 이 때 TRU의 농축도는 임계 노심의 경우에는 주기길이가 365 EFPDs가 되도록, 그리고 미임계 노심의 경우에는 초기노심 (BOC)에서 유효증배계수(k_{eff})가 0.97이 되도록 하는 값으로 정하였다.

임계 노심의 주기초 잉여반응도를 억제하기 위한 제어봉 집합체는 노심 단면 그림에서 보듯이 노심 전 영역에 방사 대칭형으로 12개를 미임계 노심에서의 핵연료집합체 자리에 대체, 삽입하였다. 이 때 핵연료는 임계, 미임계 노심 각각 27.3TRU-76.6Zr, 16.5TRU-83.5Zr의 화학적 조성을 갖고 있다.

3. 계산 결과 및 토의

3.1 중성자 스펙트럼

고려한 각각의 네 가지 경우에 대하여 활성노심(active core) 영역의 중성자 플럭스 스펙트럼의 계산 결과를 그림 2에 나타내었다. 임계로의 경우 모든 제어봉을 인출한 상태(CRSARO)보다 제어봉 삽입 상태(CRSCRI)에서의 중성자 스펙트럼이 상당히 경화되었음을 확인할 수 있다. 매우 높은 열중성자 흡수단면적의 B-10이 스펙트럼을 경화 시킨 것은 예상한 바 그대로이다. 다만 여기서 중성자 흡수체에 의한 스펙트럼 경화 효과의 크기가 적지 않아 다음 절에서 논의될 동특성 변수나 안전변수에 미치는 영향이 상당하다는데 그 의의가 있다.

본 계산에서 CRSARO와 CRSCRI 경우의 평균 중성자 에너지는 각각 96.4 keV와 110.98 keV 정도인데, 같은 임계 개념이며 Na 냉각 방식인 KALIMER 금속연료 노심의 약 200 여 keV보다도 더 낮다. 현재 개념설계 단계인 HYPER 노심의 핵연료봉 P/D값을 잠정적으로 KALIMER의 1.2보다 훨씬 큰 1.5 정도로 설정한 바 있는데 이는 납-비스무트 냉각재 물질의 비중이 KALIMER 소듐 훨씬 높아서 냉각 채널의 달성가능한 유속이 한계를 가지는 열수력학적 관점에서 비롯된 것이다. 이로 인하여 HYPER 노심내 핵연료 농축도가 매우 낮아져 핵연료의 열중성자 흡수 효과가 훨씬 감소하는 것으로 해석된다. 가급적 경한 중성자 스펙트럼을 선호하는 현재의 핵변환로 개발 현황에 비추어 볼 때, P/D 값의 변화에 따른 스펙트럼 민감도 분석을 통한 최적화 작업이 필요하다 하겠다.

핵과쇄 반응으로부터의 외부 중성자원은 그 스펙트럼이 핵분열 스펙트럼 보다 경하여 시스템의 스펙트럼을 경화시켜 줄 것으로 기대하였다. 그림 3은 본 연구에 사용된 외부 중성자원의 스펙트럼을 초우란 연료의 주요 핵종인 Pu-239의 핵분열 스펙트럼과 함께 보여주고 있다. 그러나 미임계 노심의 스펙트럼이 임계 노심보다 훨씬 연화되어 있는 결과가 주목할 만하다. 더욱이 핵분열 중성자만의

기여를 고려한 고유치 계산 결과(ADSEIG)보다 외부 중성자원 모드 계산(ADSSRC)의 스펙트럼 또한 미소하나마 연화되어 있다. 표적 영역에서부터 출발한 고에너지의 외부중성자원이 활성노심 영역으로 확산되어 가면서 감속되어 고려하는 지점 근방에서 발생한 핵분열 중성자의 에너지보다 낮아진 것이다. 그림 4와 5에 도시한 영역별 스펙트럼이 그 해석을 뒷받침 한다. 표적 영역에 바로 인접한 활성노심 영역인 3번째 육각링에선 여전히 ADSEIG보다 ADSSRC의 스펙트럼이 경하나, 노심의 반경방향 중간 부분인 5번째 육각링에 접어들면서 이미 스펙트럼은 연해져 있다. 물론 이 결과는 일반적인 미임계 노심의 스펙트럼 특성이라 단언할 수는 없다. 적어도 본 계산에 사용된 핵파쇄 중성자원의 스펙트럼에는 20 MeV를 초과하는 영역의 중성자를 포함하지 않고 있다는 점을 간과해선 안 된다. 또한, 활성노심에서의 외부 중성자 에너지 감속은 핵연료집합체 설계나 표적 설계 등의 인자에 매우 민감하다.

외부 중성자원의 감속 현상은 시스템의 중성자 증배(multiplication)에도 영향을 미친다. 핵분열 중성자에 의한 증배계수를 k 라고 할 때, 핵분열 선원 중성자 1개당 총 증배되는 중성자 개수는 $1/(1 - k)$ 가 된다. 여기에 핵분열 중성자와는 다른 에너지의 외부선원 중성자의 증배계수를 k' 라고 하면 이 때 외부 선원 중성자 1개 당 증배되는 중성자 수는 $1 + k' + kk' + k^2k' + \dots + k^n k' + \dots$, 즉 $1/(1 - k) + (k' - k)/(1 - k)$ 가 되어 시스템의 k 이 일정할 경우, k' 값에 따라 외부 중성자원에 의한 중성자 증배는 핵분열 중성자만의 효과보다 커지거나 작아지게 된다. 본 연구에서 계산된 반응율 등을 토대자료로 외부선원에 의한 중성자 증배도를 산정하여 표 2에 정리하였다. ADSSRC의 소스모드 계산의 증배계수는 ADSEIG 고유치 모드 계산 결과보다 7.16 mδk 정도 증가하였음을 보이고 있다. 활성노심 전 영역에 대한 중성자 스펙트럼이 연하여 ADSEIG 계산 결과와 비교해 볼 때 전체적으로 중성자 흡수율은 증가하고 누수율은 크게 감소하고 있다. 노심 중심부의 고에너지 외부선원에 의한 핵분열은 보다 많은 중성자를 생성하여 노심 가장자리 영역의 저에너지 외부선원의 핵분열에 의한 중성자 생성을 감소량을 보상하고 노심 바깥 경계 부근에서 더욱 연화된 스펙트럼은 중성자 누수율을 크게 감소시킴으로써 시스템의 증배계수를 증가시키는 것으로 해석된다. 따라서 핵연료봉의 P/D 값이나 활성노심의 H/R(Height-to-Radius) 등의 설계 인자는 외부 중성자원의 감속 및 증배 효과에 대한 민감도 분석을 포함하여 설정되어야 함을 시사한다.

3.2 핵연료 온도계수

활성노심 영역의 온도를 980K에서 1280K로 상승시켜 노심 계산을 수행, 도플러 효과에 의한 반응도 변화에 대한 고찰 결과를 표 4에 수록하였다. 고려한 네 가지 경우 모두 음의 반응도 계수 값을 보이고 있으며 외부 중성자원의 스펙트럼 간섭이 있는 ADSSRC의 경우를 제외한 나머지 세 경우는 온도가 상승함에 따라 모두 동일한 방향으로 핵특성이 변화하고 있다. Doppler Broadening에 의한 열중성자 흡수율이 증가하고 이로 인한 스펙트럼 경화에 기인하여 Pu-239 등 주요 핵분열성(fissile) 물질의 핵분열단면적이 감소하고 이는 곧 핵분열 중성자 생성을 감소로 이어지고 있다고 보여진다. Pu-240 등에 의한 중성자 포획(parasitic capture)이 증가함으로써 단위 중성자 흡수 당 중성자 생성율, 즉 무한증배계수 (k_{inf})는 감소하고 있는 것이다. 스펙트럼 경화에 힘입어 중성자 누수율(leakage rate)이

증가하나 중성자 흡수율 증가에 못 미쳐 비누설 확률(P_{NL})은 증가하고 있음을 볼 수 있으며 따라서 종합적으로는 핵연료 온도상승에 따른 영향, 즉 도플러 효과는 반응도 변화가 음의 방향을 따르는 일반적인 경향을 띠고 있다.

반응도 변화의 정도는 기준 노심의 스펙트럼의 경화 정도에 지배 받고 있음을 알 수 있다. 예를 들면 CRSCRI의 제어봉 삽입은 기준 노심(CRSARO)의 스펙트럼을 경화 시켜 핵연료 온도 상승에 따른 스펙트럼 경화 정도를 감소 시키고 있다. 따라서 임계 시스템의 중성자 흡수체는 시스템의 핵연료 온도계수를 양화 시키는 방향으로 작용함을 표에서 확인할 수 있고 물론 그 크기는 운전 주기에 의존한다.

본 논문에서 고려된 ADSEIG의 스펙트럼은 임계 시스템보다 훨씬 연화되어 있으므로 도플러 효과가 훨씬 크다. 미임계 시스템은 고유의 음의 반응도 즉 미임계도 이외에도 핵연료 온도 상승에 관한 한 그 반응도 계환이 임계로 보다 안정적임을 의미한다.

ADSSRC의 핵연료 온도계수는 물론 음의 값을 가지고 있으나 노심의 핵특성 변화의 방향은 나머지 세 경우와 크게 다름이 매우 흥미로운 결과이다. 앞 절에서 언급하였듯이 ADSSRC는 활성노심 영역 온도 980K를 기준으로 비교할 때 기준노심의 바깥 경계에 인접한 부근에서 ADSEIG보다도 더욱 연화된 스펙트럼을 가지고 있다. 그러므로 ADSSRC 노심의 핵연료 온도 상승 시 Doppler Broadening에 의한 중성자 스펙트럼 경화 정도가 커 핵분열 중성자 생성율은 크게 감소하고 있다. 이는 ADSEIG의 핵분열 중성자 생성율 감소와 같은 방향이다. 그러나 ADSEIG 노심에서는 활성노심의 온도 상승과 함께 중성자 누수율과 흡수율이 모두 증가하고 있지만 ADSSRC 노심에서는 감소하는 방향으로 역전되고 있다. 핵분열 중성자들은 핵연료의 도플러 효과에 의해 포획되어 스펙트럼은 경화 되지만 여전히 표적 영역 근처의 외부선원 중성자는 에너지가 높아서 도플러 포획단면적이 작아 노심 중앙 부근에서는 스펙트럼 경화에 의한 누수율 증가를 방해하고 있는 것이다. 다시 말하면, ADSSRC 노심의 외부선원 중성자는 노심 중앙 근처에서는 도플러 효과가 작아 무한증배계수의 감소폭을 ADSEIG보다 작게 만들고 바깥 경계 부근에서는 도플러효과를 가속시켜 비누설 확률의 증가 폭을 더욱 크게 함으로써 전체적으로는 음의 도플러 효과를 감소 시키고 있다. 물론 외부선원의 역할이 시스템 스펙트럼을 경화 시키는 방향으로 작용할 때는 상황이 달라질 것이며 그 반대 현상이 일어날 지도 모른다. 요컨대, 앞 절의 외부선원 중성자 증배와 더불어 시스템의 핵연료 온도 효과를 안정화하려는 방안으로서도 외부선원의 감속을 적절히 하는 방안을 모색할 만하다 하겠다.

3.3 냉각재 밀도 계수

냉각수 채널의 온도 상승에 따른 반응도 변화를 고찰하기 위하여 노심 전 영역의 냉각재 밀도를 균일하게 5% 감소 시켜 노심계산을 수행하였고 여기서 냉각재 물질의 온도 변화에 따른 핵단면적 변화는 무시하였다. 5% 냉각재 밀도 감소 시 노심반응도 변화량을 밀도 감소분에 상당하는 온도 변화량으로 나누어 냉각재 밀도계수를 계산하였다. 표 4의 계산 결과를 보면, 모든 경우에 음의 효과를 보이고 있다. 그러나 반응율 변화의 방향을 눈 여겨 보면 도플러 효과와는 반대 방향을 띠고 있으며 도플러 효과와 마찬가지로 외부선원 중성자는 냉각재 밀도 변화에 대해서도 매우 흥미롭게

대응 하고 있음이 주목된다. ADSSRC를 제외한 나머지 세 경우 모두 노심 내의 냉각재 밀도가 감소함에 따라 중성자 누수율이 증가하여 도플러 궤환에서의 방향과 일치한다. 냉각재 물질의 감속효과 감소는 스펙트럼 경화로 이어져 중성자 누수 현상을 가속시킨다고 보여진다. 그러나 중성자 흡수율은 오히려 감소하고 있는데 중성자 누수 반응과 경합하는 냉각재 물질에서 중성자 포획이 크게 감소 했기 때문이다. 스펙트럼 경화 또한 중성자 흡수율 감소의 원인이 되기도 하나 단위 핵분열 당 생성 중성자수를 증가시켜 종합적으로는 무한증배계수는 증가하고 비누설 확률은 감소하는 경향을 띠고 있는 것이다.

ADSEIG 미임계 시스템은 기준 노심 스펙트럼이 임계 기준 노심보다 연화되어 있어 냉각재 밀도 계수의 음화 정도를 크게 하고 있다. 핵연료 온도 변화에 의한 반응도 궤환과 유사한 메커니즘이다.

CRSRI 노심의 냉각재 밀도 계수는 CRSARO보다 3배 이상 그 음의 효과가 큰 값을 보이고 있다. 임계 노심의 중성자 흡수체 삽입이 냉각재 온도 변화에 대한 음의 반응도 궤환에 충분한 기여를 할 수 있음을 의미한다. CRSARO의 경우 Flooded Core와 Voided Core의 평균에너지가 각각 96.37, 98.18 keV인 반면 CRSRI 노심은 110.98, 113.98 keV의 계산값을 보였다. 냉각재 물질의 밀도가 감소하면 B_4C 물질에의 기생흡수가 증가하여 스펙트럼의 경화 효과를 더욱 크게 하는 것으로 유추할 수 있다. 그 결과 중성자 누수율은 훨씬 증가하고 포획율 증가 현상과 보합하여 큰 음의 반응도를 유발함을 보여주고 있는 결과로 해석된다.

ADSSRC 미임계 노심의 외부중성자원은 냉각재 온도 궤환에도 상당한 영향을 주고 있으며 이 효과는 도플러 궤환에서와 유사한 메커니즘으로 해석된다. 도플러 궤환과 다른 점은 중성자 흡수율의 감소 방향은 일치하나 핵분열 중성자 생성율의 변화 방향이 역전되는 현상이다. 그러나 여기서, 가속기 구동기 미임계로의 냉각재 밀도계수에 관한 한, 노심 중앙 표적물질 영역의 밀도 감소에 의한 외부 선원의 중성자 증배에의 기여도 변화 영향을 배제한 계산 결과에 정도 이상의 의미를 부여하기 어렵다는 것을 주목해야 한다. 즉 노심 내 냉각수 온도 상승에 의하여 밀도가 감소하면, 아울러 노심 중앙의 액체 표적인 납-비스무트 물질의 밀도도 같이 감소하여 외부선원의 선원 강도나 중성자론적 중요도(neutron importance)가 변화하는 양이 상당하기 때문에 그 효과를 무시한 채 블랑켓 영역만의 효과를 독립적으로 분리하여 냉각재온도 궤환 효과를 논할 수 없음을 의미한다.

4. 결론 및 추후 연구사항

이상의 결과로부터 다음과 같은 결론에 이를 수 있다.

- 초우란 핵종 소멸 목적으로 하는 Pb-Bi 냉각 방식의 미임계 노심은 외부 중성자원의 간섭효과를 배제한 채 블랑켓 영역의 핵연료 물질의 효과만을 고려하였을 때 동일 설계 요건의 임계 노심에 비해 중성자 스펙트럼이 연한 경향을 지닌다.
- 그러므로 미임계 노심은 임계 노심보다 핵연료 온도계수 및 냉각재 밀도계수 모두 그 음의 궤환 효과가 더욱 크므로 시스템의 안정성을 구현하기에 유리하다.
- 중성자 흡수체는 초우란 핵변환 노심의 냉각재 온도 궤환 효과를 음화시키는 데 충분한 역할을

할 수 있다.

- 외부 중성자원은 시스템 스펙트럼과 중성자 증배는 물론 시스템 설계 변수에 상당한 영향을 미치며 그 방향 또한 매우 민감하다. 따라서 향후 연구사항으로 미임계 노심의 외부중성자원과 블랑켓 영역의 상호 작용에 대한 연구를 통하여 두 개념 간 핵특성 비교는 재평가할 필요가 있다 하겠다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발중장기계획사업의 일환으로 한국원자력연구소의 지원에 의해서 수행되었으며 일부는 한국과학재단 지정 방사선안전신기술연구센터의 지원을 받았음.

참고 문헌

1. 박원석 외, "HYPER 시스템 설계연구," KAERI/TR-1316/99, KAERI, 1999.
2. 김영철 외, "액체금속로 요소기술 개발," KAERI/RR-17173/96, KAERI, 1997.
3. 김정도 외, "KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증," KAERI/TR/97, KAERI, 1997
4. B. C. Na *et al.*, "OECD/NEA Comparison Calculations for an Accelerator-Driven Minor Actinide Burner: Analyses of Preliminary Results," *Proceedings of Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators*, Aix-en-Provence, France, November 1999.
5. R. D. Lawrence, "The DIF3D Nodal Neutronics Option for Two-, and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry," ANL-83-1, ANL, 1983.
6. 김용남 외, "가속기 구동 미임계 핵변환 노심 계산에 대한 중성자 확산 근사의 타당성 평가," 2000 춘계 학술논문발표집, 한국원자력학회, 2000.

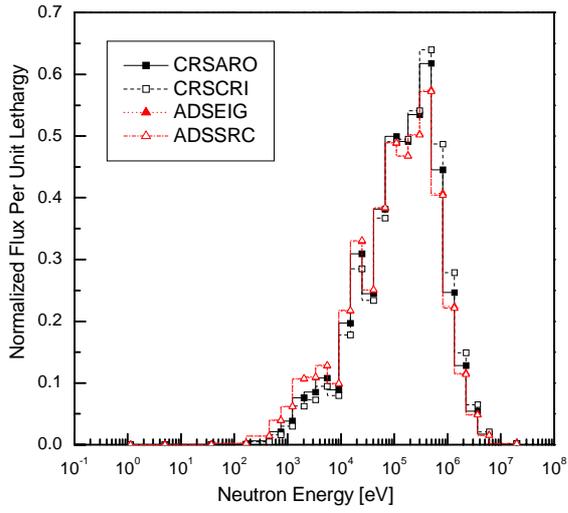


그림 2. 임계 및 미임계 노심의 중성자속 스펙트럼

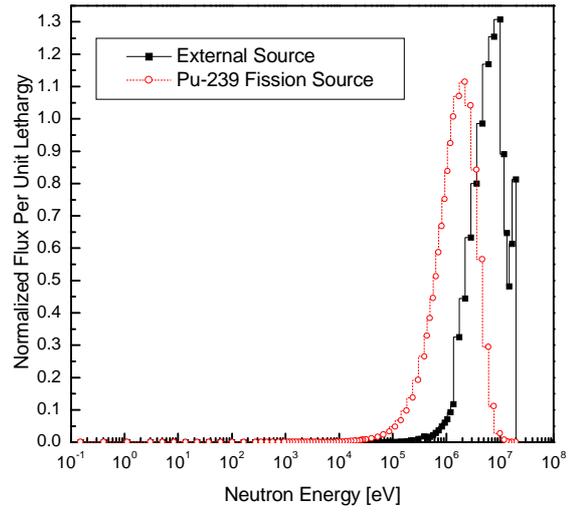


그림 3. 외부 중성자원 및 Pu-239의 핵분열 스펙트럼

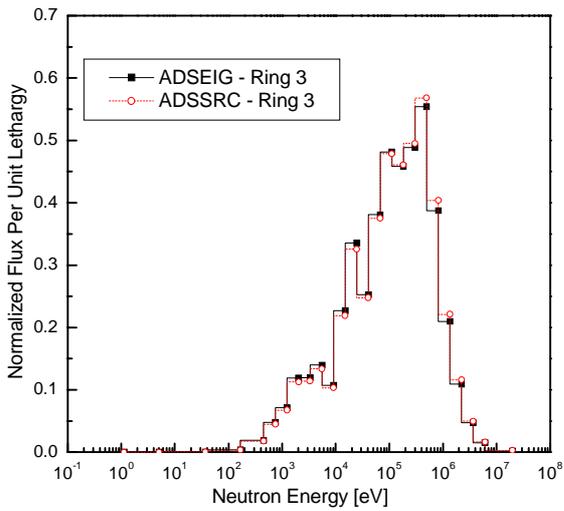


그림 4. 미임계 노심 3번째 육각링 영역의 중성자속 스펙트럼

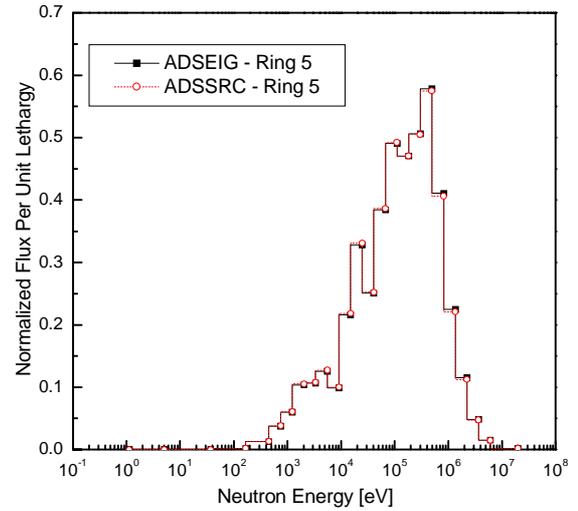


그림 5. 미임계 노심 5번째 육각링 영역의 중성자속 스펙트럼

표 2. 미임계 시스템의 중성자 증배계수 계산 결과

	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	Multiplication Factor
ADSEIG	1.76013E+18	1.34495E+19	3.66667E+16	1.47175E+19	0.96998
ADSSRC	1.67835E+18	1.34716E+19	9.18333E+16	1.47139E+19	0.97714
Difference	-8.17833E+16	2.21167E+16	5.51667E+16	-3.61778E+15	0.00716

표 3. 핵연료 온도계수 계산 결과

	k_{eff}	FTC ^{a)} (pcm/ k_{eff})	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} ($=\eta f$)	P_{NL} ^{b)}
CRSAR	1.18779 c)	-	1.11448E+18	1.14996E+19	3.06000E+16	1.49465E+19	1.30321	0.91143
O	1.18687 d)	0.216 62	1.11503E+18	1.15081E+19	3.07000E+16	1.49457E+19	1.30218	0.91145
Differen			5.50000E+14	8.50000E+15	1.00000E+14	- 8.46200E+14	-0.00103	0.00002
CRSCRI	1.00002	-	1.59984E+18	1.33344E+19	3.57000E+16	1.48988E+19	1.12032	0.89262
	0.99940	0.206 59	1.60035E+18	1.33425E+19	3.58000E+16	1.48981E+19	1.11959	0.89264
Differen			5.10000E+14	8.10000E+15	1.00000E+14	- 7.33361E+14	-0.00073	0.00003
ADSEI	0.96998	-	1.76013E+18	1.34495E+19	3.66667E+16	1.47175E+19	1.09727	0.88400
G	0.96863	0.479 12	1.76165E+18	1.34651E+19	3.68333E+16	1.47135E+19	1.09571	0.88402
Differen			1.51667E+15	1.55333E+16	1.66667E+14	- 4.00772E+15	-0.00156	0.00003
ADSSR	0.97714	-	1.67835E+18	1.34716E+19	9.18333E+16	1.47139E+19	1.09971	0.88854
C	0.97622	0.320 58	1.61055E+18	1.29560E+19	9.05000E+16	1.41318E+19	1.09843	0.88874
Differen			- 6.77967E+16	- 5.15667E+17	- 1.33333E+15	- 5.82100E+17	-0.00128	0.00020

a) Fuel Temperature Coefficient ($\delta\rho/\delta T$)

b) Non-Leakage Probability

c) k_{eff} at 980K for Active Core

d) k_{eff} at 1280K for Active Core

표 4. 냉각재 밀도계수 계산 결과

	k_{eff}	CDC ^{a)} (pcm/ %)	Leakage Rate	Absorption Rate	(n, 2n) Prod. Rate	Fission Prod. Rate	k_{inf} ($=\eta f$)	P_{NL}
CRSAR O	1.18779 b)	-	1.11448E+18	1.14996E+19	3.06000E+16	1.49465E+19	1.30321	0.91143
	1.18587 c)	0.397 38	1.18772E+18	1.14512E+19	3.03000E+16	1.49521E+19	1.30919	0.90580
Differen			7.32400E+16	- 4.84000E+16	- 3.00000E+14	5.60661E+15	0.00598	-0.00563
CRSCR I	1.00002	-	1.59984E+18	1.33344E+19	3.57000E+16	1.48988E+19	1.12032	0.89262
	0.99618	1.124 49	1.68426E+18	1.33126E+19	3.54000E+16	1.49043E+19	1.12255	0.88743
Differen			8.44200E+16	- 2.18000E+16	- 3.00000E+14	5.41447E+15	0.00222	-0.00519
ADSEI G	0.96998	-	1.76013E+18	1.34495E+19	3.66667E+16	1.47175E+19	1.09727	0.88400
	0.96771	0.704 98	1.87583E+18	1.33724E+19	3.63333E+16	1.47207E+19	1.10383	0.87669
Differen			1.15700E+17	- 7.71667E+16	- 3.33333E+14	3.20507E+15	0.00656	-0.00731
ADSSR C	0.97714	-	1.67835E+18	1.34716E+19	9.18333E+16	1.47139E+19	1.09971	0.88854
	0.97570	0.439 32	1.67700E+18	1.25741E+19	8.93333E+16	1.38176E+19	1.10676	0.88158
Differen			- 1.35000E+15	- 8.97517E+17	- 2.50000E+15	- 8.96217E+17	0.00705	-0.00696

a) Coolant Density Coefficient ($\delta\rho/\delta T$, $\delta T = 343\text{K}$)

b) k_{eff} at Flooded System

c) k_{eff} at 5% Voided System