2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

몬테칼로 연소계산 코드 MCDEP의 개발

Development of Monte Carlo Depletion Code MCDEP

김강석, 김교윤, 이정찬, 지성균
한국원자력연구소
305-333 대전시 유성구 덕진동 150

요약

원자노심 분석의 표준계산으로 몬테칼로 방법을 이용한 중성자 수송계산이 이용된다. 대표적으로 사용되는 몬테칼로 계산 코드로는 미국의 Los Alamos 국립연구소에서 개발한 MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code)를 들 수 있다. 그러나 이러한 몬테칼로 코드를 이용하여 원자로심을 분석할 때의 문제점은 연소계산이 불가능하고 노심의 실제 온도와 같이 다양한 온도를 처리할 수 없다는 것이다. 본 보고서에서는 몬테칼로 코드인 MCNP를 이용하여 연소계산을 수행할 수 있는 코드시스템인 MCDEP (Monte Carlo Depletion Code Package)를 개발하였다. MCNP와 지수행렬법 (Exponential Matrix method)을 이용한 ORIGEN-2의 연소계산모듈을 통합하여 사용자가 MCNP용 입력과 연소계산에 필요한 입력만을 통하여 자동으로 수행될 수 있도록 코드시스템을 구축하였다. 연소계산의 효율화 및 중성자 단면적이 제공되지 않는 반감기가 짧은 붕괴 핵종 등의 처리를 위하여 연소사슬을 단순화 하였다. 가압경수로의 핵연료봉 및 집합체에 대하여 연소계산결과는 HELIOS 및 CASMO-3의 반응도 및 출력분포와 유사함을 보여 주었다.

Abstract

Monte Carlo neutron transport calculation has been used to obtain a reference solution in reactor physics analysis. The typical and widely-used Monte Carlo transport code is MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) developed in Los Alamos National Laboratory. The drawbacks of Monte-Carlo transport codes are the lacks of the capacities for the depletion and temperature dependent calculations. In this research we developed MCDEP (Monte Carlo Depletion Code Package) using MCNP with the capacity of the depletion calculation. This code package is the integration of MCNP and

depletion module of ORIGEN-2 using the matrix exponential method. This code package enables the automatic MCNP and depletion calculations only with the initial MCNP and MCDEP inputs prepared by users. Depletion chains were simplified for the efficiency of computing time and the treatment of short-lived nuclides without cross section data. The results of MCDEP showed that the reactivity and pin power distributions for the PWR fuel pins and assemblies are consistent with those of CASMO-3 and HELIOS.

I. 서론

최근 컴퓨터의 구조와 하드웨어 설계에서 혁신과 발전으로 컴퓨터의 성능이 획기적으로 향상되었다. 벡터와 병렬처리 구조를 가지는 컴퓨터가 보편화되고 CPU를 비롯한 마이크로칩은 소형화되어 아주 빠른 신호처리를 가능케 한다. 이러한 진보로 말미암아 과학 프로그램의 작성에 있어서 더 크고 복잡한 물리적 시스템의 모델링을 가능케 한다. 이러한 발전으로 몬테칼로 방법은 강력한 컴퓨터를 바탕으로 강력한 방법으로 대두되고 있다. 노물리의 해석에서 몬테칼로 방법에 의한 중성자 수송계산은 표준 해를 얻는데 사용된다.

미국의 Los Alamos 국립연구소에서 개발한 MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) [1] 코드는 전세계적으로 가장 보편적으로 사용되는 몬테칼로 코드이다. 몬테칼로 계산은 가정이나 근사를 가장 작게 사용하는 까닭에 표준계산에 사용되나 연소계산과 다양한 온도계산이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위하여 여러 연구그룹들은 연소계산 및 다양한 온도계산이 가능한 코드절차를 개발하고자 노력하고 있다.

Los Alamos 국립연구소는 MONTEBURNS [2]을 개발하였는데 이 코드는 MCNP 와 ORIGEN-2 [3]의 별도 코드를 결합한 형태로 연소계산이 가능하다. AET (Advanced Energy Technology, Inc)는 MCBURN [4]을 개발하였는데 이것 또한 MCNP와 ORIGEN-2의 결합이다. MIT의 연구그룹 또한 MCNP와 ORIGEN-2의 결합의 형태인 MCODE [5]를 개발하였다. 이러한 코드절차는 MCNP와 ORIGEN-2를 그대로 두고 MCNP 입력과 ORIGEN-2 입력을 자동으로 만들어주고 또한 계산을 연속적으로 수행하게 하는 방식이다.

서울대학교의 연구그룹은 중성자 수송계산 만을 목적으로 하는 몬테칼로 코드를 개발하고 ORIGEN-2의 라이브러리와 방법론을 그대로 사용하는 연소계산 모듈을 결합하여 MC-CARD [6] 코드를 개발하였다. 이 코드는 현재 연소계산에 다양한 온도 계산을 하도록 개발하고 있고 온도궤환효과 또한 고려할 수 있다. 그러나 이러한 코드들은 아직 완전하지 않고 지속적으로 개발되고 있는 단계에 있다. 또 다른 문제점은 ORIGEN-2의 연소계산 및 라이브러리를 전혀 비판 없이 사용하고 있다는 사실이다.

본 연구에서는 MCNP와 ORIGEN-2의 연소계산 방법과 동일한 연소계산모듈을 이용한 몬테칼로 연소계산 모듈인 MCDEP (Monte Carlo Depletion Code Package)를 개발하였다. 또한 ORIGEN-2의 연소계산에서의 문제점을 분석하고 연소사슬과 라이브러리를 개선하여 연소절차를 개선하였다. MCDEP는 연소초기의 MCNP의 입력과 MCDEP의 입력으로

연소계산이 자동으로 수행되도록 준비되었다. MCDEP는 새롭게 개발되는 원자로의 표준 및 검증코드로 사용할 수 있다.

가압경수형원자로의 핵연료봉 및 핵연료집합체에 대하여 벤치마크 계산을 수행하고 이 코드절차의 유효성을 보기 위하여 기존의 상업용 격자계산코드인 CASMO-3 [7] 또는 HELIOS [8]의 계산결과와 반응도 및 봉출력분포를 비교하였다.

II. 방법론

II.1 행렬지수함수법 [9,10]

노물리 분석에 있어 연소가 진행됨에 따라 핵연료의 구성혼합물이 지속적으로 변화한다. X_i 가 각각의 핵종을 표현하고, 붕괴, 중성자와의 반응, 핵분열에 의한 생성을 행렬 A로 나타내면, 핵종의 연소 방정식은 다음과 같이 선형 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{d\vec{X}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \vec{X} \,, \tag{1}$$

일반적으로 위의 행렬미분식은 모든 핵종을 포함하는 경우 해를 구하기가 간단하지 않다. CASMO, HELIOS, DIT 등의 격자계산 코드들은 선형화를 통하여 간편하고 빠르게 계산을 수행하고 있다. 그러나, 선형화에 많은 가정을 포함하고 있어야 하며, 새로운 핵종의 첨가로 인한 연소사슬의 변화가 발생하면 프로그램 자체를 수정해야 하는 불편함이 있다. 반면에 ORIGEN-2에서는 행렬지수함수법을 이용하여 (1)식을 직접 풀고 있다. 많은 수의 핵종을 제한 없이 처리할 수 있는 방법이므로 MCDEP에서 적용하고 있다. 즉, (1)식은

$$\vec{X}(t) = \exp(\mathbf{A}t) \cdot \vec{X}(0) \,, \tag{2}$$

과 같은 형태로 나타난다. 여기서 행렬인 exp(**A**t)는 테일러 전개로 계산한다. 즉,

$$\exp(\mathbf{A}t) = I + At + \frac{(At)^2}{2!} + \cdots\cdots = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(At)^m}{m!} \,. \tag{3}$$

이 방법의 단점은 수렴이 느리고 오차의 누적에 의한 오답의 가능성이다. 그러나, 행렬의 인자가 작은 경우 수렴 속도는 매우 빨라진다.

$X_i(t)$ 가 핵종 i 의 수밀도이며, λ_i 는 붕괴상수, σ_i 는 1-군 중성자 흡수단면적, ϕ_i 는 1군 중성자속, ℓ_{ij} 는 타 핵종의 방사 붕괴 때 핵종 i 가 생성되는 분율, f_{ik} 는 핵종 k 가 중성자와의 반응으로 핵종 i 가 생성되는 분율이라고 하면, 연소방정식은 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{N} \ell_{ij} \lambda_j X_j + \bar{\phi} \sum_{k=1}^{N} f_{ik} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \sigma_i \bar{\phi}) X_i \quad (i = 1, ..., N), \tag{4}$$

각 1-군 중성자속과 흡수단면적은 비균질 수송계산에서 구할 수 있으며, 다른 인자들은 라이브러리에서 제공된다. 연소 사슬에 대한 전체 행렬은 행렬지수법으로 풀기에는 적절하지 않다. 따라서, 장수명 핵종과 단수명 핵종으로 구분하여 행렬을 처리한다. 장수명 핵종은 테일러 전개법을 효과적으로 적용할 수 있으며, 단수명 핵종에 대하여는 반복계산법을 적용할 수 있다.

II.2 라이브러리

MCDEP에 사용되는 라이브러리는 MCNP계산에 사용되는 라이브러리와 연소계산에 사용되는 라이브러리로 나눌 수 있다. MCNP용 라이브러리는 NJOY를 사용하여 ENDF/B 라이브러리를 처리하여 구할 수 있다. 연소계산에 사용되는 라이브러리는 ORIGEN-2의 라이브러리로 핵종 별로 1군 중성자단면적과 핵붕괴 시 생성되는 핵분열물질의 생성율을 포함하는 라이브러리와 반감기와 각종 핵붕괴에 따른 분율을 포함하는 라이브러리를 포함한다. 1군 중성자단면적은 MCDEP의 입력에 따라 필요한 핵종들은 MCNP 계산을 통하여 연소도 계산에 따라 지속적으로 수정한다. MCNP계산에 따라 특정연소에서 MCNP의 라이브러리에 포함되는 전 핵종을 수정할 수도 있으나 이러한 과정은 지나치게 과도한 전산시간을 필요로 하므로 비효율적이다. 따라서 연소계산에서 중요한 핵종에 대하여만 1군 단면적를 수정하고 나머지는 라이브러리에 포함되어 있는 값을 그대로 이용한다. 입력에 포함되지 않은 핵종의 1군 단면적에서의 오차를 줄이기 위하여 대상으로 삼는 단일 핵연료봉에 대하여 MCNP계산을 미리 수행하여 라이브러리에 포함된 비중요 핵종의 1군 단면적을 미리 개선한 후 사용한다.

ORIGEN-2는 원래 노물리용으로 개발된 것이 아니어서 지나치게 많은 핵종을 포함하고 있을 뿐만 아니라 반감기가 짧거나 단면적이 크지 않은 핵종에 대하여는 단면적 자료가 없는 까닭에 이러한 핵종의 적절한 처리없이 사용하는 것은 오히려 계산의 신뢰도를 떨어뜨린다. 뿐만 아니라 연소계산시간 또한 길어질 수 밖에 없다. 따라서 ORIGEN-2의 라이브러리에서 연소사슬을 단순화하여 계산의 효율을 높일 뿐만 아니라 ORIGEN-2의 라이브러리가 포함하는 핵종이 거의 MCNP 라이브러리에 포함되도록 수정하였다. 또다른 ORIGEN-2 라이브러리의 문제점은 핵분열 반응 시 핵분열생성물을 발생하는 핵분열원소의 수가 8개 제한되어 사용된다는 것이다. 이러한 문제는 현재의 단계에서는 고려되지 않았으나 핵분열물질의 생성율이 확보가 되면 수의 제한없이 입력으로 사용할 수 있도록 프로그램을 수정하였다.

MCNP4C 계산에 사용된 라이브러리는 한국원자력연구소에서 생산된 결과물을 이용하였다.[11]

II.3 알고리듬

MCDEP의 계산 알고리듬은 그림 1에서 보여지는 바와 같다. MCDEP에서 기본적으로 요구하는 MCNP의 입력에 맞추어 입력을 작성하고 별도의 간단한 MCDEP의 입력을 작성한다. MCDEP의 입력은 MCNP의 실행파일명, ORIGEN-2 라이브러리 파일명, 출력밀도, 제논상태, 그리고 1군 단면적을 수정할 핵종 및 연소구간설정 등을 포함한다.

이러한 입력을 바탕으로 세부격자에서의 중성자속과 1군단면적을 계산할 핵종별 미시적 반응도를 출력할 Tally를 자동으로 준비하여 준비된 MCNP입력에 추가한 후 MCNP를 수행한다. MCNP 계산이 종료되면 계산결과로부터 유효증배계수와 출력분포를 저장 및 계산을 하고 연소계산을 위하여 1군 단면적을 계산한다. 여기에서 구한 1군 단면적을 이용하여 ORIGEN-2의 단면적 라이브러리를 수정한 후 연소계산을 수행한다. 이때 입력으로 사용되는 출력밀도로부터 중성자속의 절대값을 계산하고 입력으로 주어지는 연소구간을 시간으로 환산하여 연소계산을 수행하여 새로운 혼합물을 계산한다. 이를 이용하여 MCNP 입력을 재구성한다. 연소계산 후 생성되는 수많은 핵종 중 MCNP의 라이브러리에 포함되는 모든 핵종을 MCNP의 새로운 입력에 포함한다. 연소구간을 충분히 길게 하도록 예측-수정법을 이용하여 연소후 생성 핵종들의 입자수를 계산한다. 이러한 과정을 계속해서 반복하여 연소계산을 수행한다.

II.4 MCDEP의 기능

MCDEP는 FORTRAN90으로 작성되었다. MCDEP 내부에서 MCNP를 반복적으로 불러 별도의 계산을 수행하고 계산 종료 시 결과를 이용하여 연소계산을 MCDEP 내부에서 수행한다. 다른 MCNP와 ORIGEN-2의 별도의 두 개의 코드를 연속적으로 불러 사용하는 것과는 다른 방식이다. PC에서 사용 가능할 뿐만 아니라 MCNP의 수행이 가능한 어떠한 컴퓨터에서 수행 가능하다. 특히 MCNP는 병렬계산이 가능하므로 Linux Cluster와 같은 병렬컴퓨터에서 병렬계산 또한 가능하다. 계산의 입력에 따라 사용 가능한 CPU의 수를 조정할 수 있다. 사용자가 Tally를 만들 필요가 없으며 프로그램 내부에서 자동으로 생성하여준다. 제논의 상태를 평형제논, 무제논 등의 입력조건에 따라 내부에서 적절하게 계산한다. 사용자의 입력에 따라 연소 시 지속적으로 수정하여야 할 1군 단면적에 해당하는 핵종 들을 지정할 수 있다.

III. 벤치마크 계산

MCDEP코드의 유효성을 보기 위하여 가압경수형 원자로의 여러 가지 핵연료봉과 핵연료집합체에 대하여 벤치마크 계산을 수행하였다. 단일 핵연료봉의 경우 UO_2 핵연료봉

에 대하여 연소계산을 수행하여 상업용 격자계산코드인 HELIOS와 CASMO-3의 계산 결과와 비교하였다. 또한 17x17 핵연료집합체의 경우 가연성 독봉이 없는 경우와 PYREX 독봉을 포함하는 경우에 대하여 연소 계산을 수행하여 각각 비교하였다.

표 1에서는 UO_2 핵연료봉의 유효증배계수를 연소도에 따라 비교하였다. 표에서 보여지는 바와 같이 MCDEP는 연소도 40 MWD/KGU에서 HELIOS에 비하여는 약 670 pcm 정도 높고 CASMO-3에 비하여는 약 280 pcm 정도 높은 값을 보인다. 전체적으로는 CASMO-3의 값과 더 근접해 있음을 알 수 있다. 그림 2에서는 기존의 ORIGEN-2 라이브러리를 사용한 경우와 수정 라이브러리를 사용한 경우를 비교한 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 기존의 ORIGEN-2 라이브러리를 그대로 사용한 경우와 연소사슬을 변경시킨 경우 연소도가 진행함에 따라 점차 차이가 커짐을 알 수 있다. 기존의 라이브러리를 사용한 경우 거의 모든 MCNP+ORIGEN-2 형식의 연소계산에서 연소도 40 MWD/KGU 이상에서 1000 pcm 이상의 반응도 차이가 나는데 연소사슬의 변경으로 반응도가 약 700 pcm 정도 줄어든다. 이러한 사실이 보여주는 바는 연소사슬의 변경을 통하여 이러한 차이가 거의 해소될 수 있다는 것이다.

표 2에서는 가연성 독봉을 포함하지 않은 핵연료집합체에 대하여 유효증배계수를 각각 비교한 것이다. 표에서 보여지는 바와 같이 HELIOS와 CASMO-3의 계산결과와 연소 전구간에 대하여 300 pcm 이내에서 잘 일치하고 있음을 보여준다. 이러한 사실은 기존의 몬테칼로 연소계산 코드들이 보여주는 연소도 40 MWD/KGU이상에서 기존의 상업용 격자계산코드에 비하여 1000 pcm 정도 과대평가하는 문제를 해결해 주는 것으로 보여진다. 그림 2와 3에서는 각각 연소도 0 MWD/KGU와 20 MWD/KGU에서의 출력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 최대 1.0%이내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 연소도가 진행됨에 따라 출력분포의 차이는 더욱더 줄어들고 있음을 보여준다.

표 3는 PYREX 가연성독봉을 포함하는 핵연료집합체의 유효증배계수를 CASMO-3, HELIOS와 비교한 것이다. 표에서 보여주는 바와 같이 전 연소구간에서 상당히 큰 차이를 보여주고 있다. CASMO-3의 경우 그림에서 보여주는 바와 같이 독봉이 안내관의 위치에 있지 않고 핵연료봉의 위치에 놓여있는 경우와 외곽에 위치하는 경우 계산의 결과에 신뢰성이 없는 것으로 알려져 있다. HELIOS의 경우 경계면류의 커플링 조건에 따라 계산결과가 상당히 큰 차이를 보여준다. 본 계산에서는 일반적으로 저자가 권장하는 조건을 사용하였으나 여전히 큰 문제점을 보여주는 것으로 추정된다. 몬테칼로 연소계산 코드의 필요성은 바로 이러한 문제들을 해결하고 검증하는 데 있다고 할 수 있겠다. 그림 4와 5에서는 각각 연소도 0 MWD/KGU와 20 MWD/KGU에서의 출력분포를 나타낸 것이다. 핵연료집합체의 반응도에서는 상당한 차이를 보여주고 있지만 출력분포는 그림에서 보여주는 바와 최대 3.0% 이내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 토의

몬테칼로 계산 코드인 MCNP와 ORIGEN-2에서 사용되는 행렬지수법을 사용하는 연소계산 모듈을 합하여 몬테칼로 연소계산절차인 MCDEP를 개발하였다. 이러한 코드절차를 이용하여 실험자료가 존재하지 않거나 충분하지 않은 핵연료 집합체 또는 노심의 반응도 및 출력분포를 계산하는 표준절차로 활용할 수 있다. 가압경수형 원자로의 핵연료 및 집합체의 벤치마크 계산결과 MCDEP는 상업용 격자계산코드인 HELIOS와 CASMO-3의 계산결과와 반응도 및 출력분포에서 잘 일치 하였다. 그러나 PYREX 가연성독봉을 비정상적으로 위치시킨 경우 CASMO-3와 HELIOS와 상당한 차이를 보여준다. 이러한 차이는 상업용 격자계산코드들의 제한적 기능으로 인한 것으로 판단이 된다.

MCNP는 다양하고 복잡한 기하구조를 지닌 복잡한 문제의 계산에 적절하므로 점차 노심의 내부구조가 다양화 되는 상황과 전체노심을 수송계산을 통하여 노물리를 분석하고자 하는 추세에서 전산기의 기능이 지속적으로 향상되고 있으므로 앞으로의 전망은 희망적이다. 온도궤환효과의 고려 차원에서 다양한 온도를 처리하는 것은 앞으로 추가 되어야 할 과제이다.

참고문헌

[1] J. F. Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Version 4B, LA-12625-M, Los Alamos National Lab. (1997)

[2] D. I. Poston, H. R. Trellue, "User's Manual, Version 2.0 for MONTEBURNS, Version 1.0," LA-UR-99-4999, Los Alamos National Lab. (1999)

[3] M. J. Bell, "ORIGEN-The ORNL Isotope Generation and Depletion Code," ORNL-4628 (1973)

[4] "MCBURN A MCNP Monte Carlo Depletion Utility Program," AET, Inc., Cupertino, California, USA (1999)

[5] Zhiwen Xu, et al., "An improved MCNP-ORIGEN Depletion Program (MCODE) and its verification for High-Burnup Applications," PHYSOR 2002, Seoul, Korea, Oct. 7~10 (2002)

[6] H. J. Shim et al., "Monte Carlo Depletion Analysis of a PWR with the MCNAP," M&C 99 Madrid, Int. Conf. on Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Applications, 27-30 September 1999, Madrid, Spain (1999)

[7] M. Edenius et al., "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/2 (1989)

[8] R. J. Stamml èr et al., "HELIOS Methods," Studsvik Scandpower (1998)

[9] A. G. Croff, "A User's Manual for ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (1980)

[10] S. J. Ball and R. K. Adams, "MATEXP, A General Purpose Digital Computer Program for Solving Ordinary Differential Equations by the Matrix Exponential Method," ORNL-TM-1933 (1967)

[11] 장종화, "핵자료 체제 구축 기반연구," KAERI/RR-2121/2000, 2001.

표 1. 단일 UO_2 핵연료봉에 대한 연소도에 따른 유효증배계수 비교

연소도 (MWD/KGU)	MCDEP		HELIOS		CASMO-3	
	Keff	Std	Keff	Δρ (pcm)	Keff	Δρ (pcm)
0.0	1.44172	0.00135	1.44505	-160	1.44293	-58
0.5	1.39046	0.00141	1.38885	83	1.39321	-142
1.0	1.38990	0.00163	1.38127	450	1.38542	233
2.0	1.37718	0.00156	1.37074	341	1.37455	139
3.0	1.36511	0.00159	1.36087	228	1.36435	41
4.0	1.35565	0.00162	1.35085	262	1.35401	89
5.0	1.34679	0.00164	1.34069	338	1.34359	177
7.5	1.31975	0.00156	1.31509	268	1.31771	117
10.0	1.29155	0.00157	1.29017	83	1.29280	-75
12.5	1.26943	0.00143	1.26608	208	1.26886	35
15.0	1.24860	0.00167	1.24291	367	1.24582	179
17.5	1.22701	0.00163	1.22041	441	1.22358	228
20.0	1.20253	0.00151	1.19858	274	1.20200	37
25.0	1.1614	0.00151	1.15670	350	1.16062	58
30.0	1.12472	0.00172	1.11629	671	1.12047	337
35.0	1.08350	0.00152	1.07711	548	1.08130	188
40.0	1.04606	0.00156	1.03876	672	1.04302	279

표 2. 독봉이 없는 핵연료집합체의 연소도에 따른 유효증배계수 비교

연소도 (MWD/KGU)	MCDEP		HELIOS		CASMO-3	
	Keff	Std	Keff	Δρ (pcm)	Keff	Δρ (pcm)
0.0	1.46855	0.00071	1.46585	125	1.46586	125
0.5	1.41424	0.00068	1.41483	-29	1.41461	-18
1.0	1.40987	0.00065	1.40732	129	1.40695	147
2.0	1.39972	0.00066	1.39711	133	1.39647	166
3.0	1.39006	0.00065	1.38756	130	1.38676	171
4.0	1.38018	0.00076	1.37788	121	1.37695	170
5.0	1.37054	0.00080	1.36808	131	1.36702	188
7.5	1.34272	0.00065	1.34320	-27	1.34212	33
10.0	1.31851	0.00073	1.31869	-10	1.31793	33
12.5	1.29396	0.00071	1.29463	-40	1.29437	-24
15.0	1.27159	0.00081	1.27112	29	1.27147	7
17.5	1.24871	0.00069	1.24810	39	1.24913	-27
20.0	1.22689	0.00070	1.22548	94	1.22717	-19
25.0	1.18264	0.00074	1.18121	102	1.18440	-126
30.0	1.14062	0.00075	1.13769	226	1.14214	-117
35.0	1.09712	0.00075	1.09455	214	1.10005	-243
40.0	1.05435	0.00069	1.05170	239	1.05803	-330

표 3. PYREX 독봉을 포함한 핵연료집합체의 연소도에 따른 유효증배계수 비교

연소도 (MWD/KGU)	MCDEP		HELIOS		CASMO-3	
	Keff	Std	Keff	Δρ (pcm)	Keff	Δρ (pcm)
0.0	1.14821	0.00093	1.15242	-318	1.1702	-1637
0.5	1.11272	0.00086	1.11998	-583	1.13686	-1908
1.0	1.11229	0.00086	1.11718	-394	1.13372	-1699
2.0	1.11118	0.00093	1.11476	-289	1.13064	-1549
3.0	1.1057	0.00096	1.11279	-576	1.12808	-1794
4.0	1.10452	0.00085	1.11080	-512	1.12544	-1683
5.0	1.10177	0.00096	1.10869	-567	1.12271	-1693
7.5	1.0941	0.00085	1.10298	-736	1.11556	-1758
10.0	1.08894	0.00081	1.09865	-812	1.10993	-1737
12.5	1.08599	0.00087	1.09566	-813	1.10563	-1636
15.0	1.08386	0.00086	1.09425	-876	1.10293	-1595
17.5	1.08477	0.00081	1.09453	-822	1.10195	-1437
20.0	1.08564	0.00083	1.09643	-906	1.10267	-1423
25.0	1.09262	0.00073	1.09994	-609	1.105	-1025
30.0	1.09882	0.00083	1.10206	-268	1.10793	-748
35.0	1.08834	0.00069	1.08824	8	1.0964	-675
40.0	1.06197	0.00069	1.05627	508	1.06574	-333

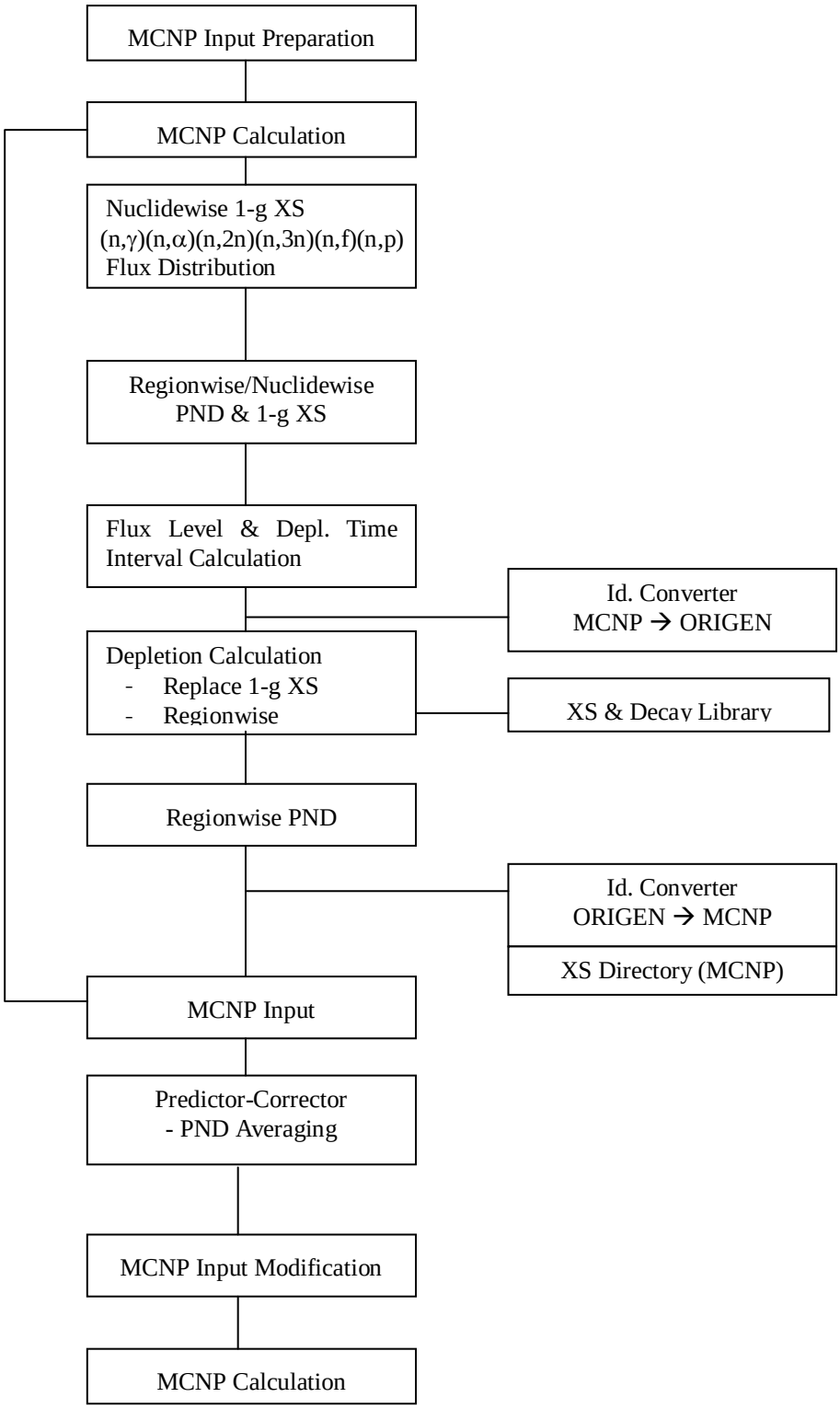

그림 1. MCDEP 계산 흐름도

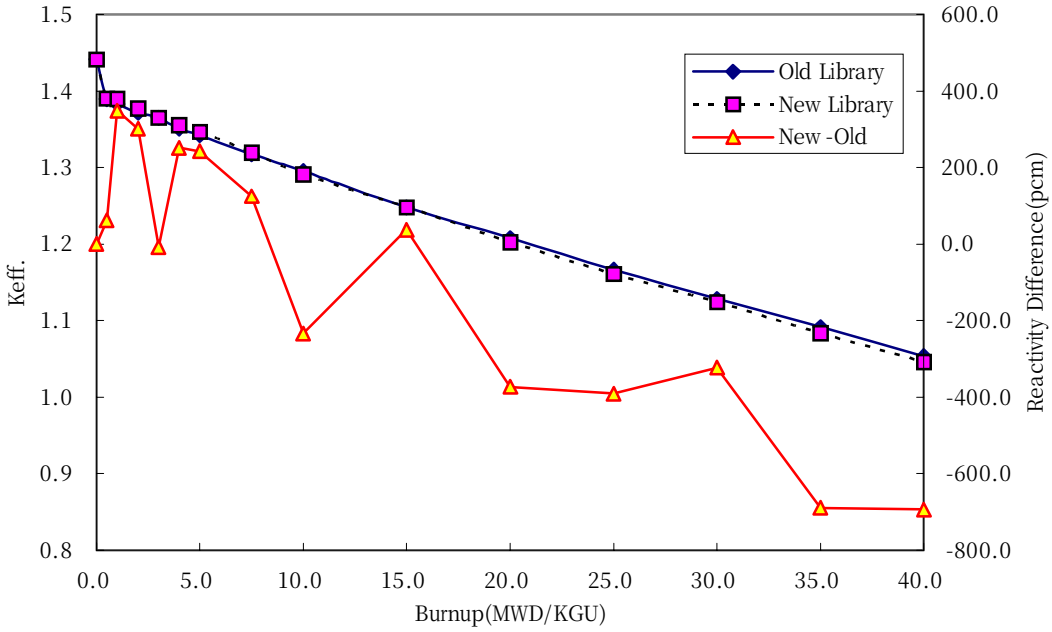

그림 2. 연소라이브러리에 따른 연소도에 따른 유효증배계수

0.000 0.000 0.000								MCDEP HELIOS CASMO3
1.056 1.030 1.041	0.993 1.004 1.004							
1.060 1.030 1.042	0.995 1.005 1.003	1.006 1.006 1.003						
0.000 0.000 0.000	1.045 1.032 1.048	1.052 1.035 1.050	0.000 0.000 0.000					
1.052 1.030 1.041	0.999 1.005 1.002	0.992 1.009 1.005	1.066 1.046 1.061	1.054 1.051 1.039				
1.057 1.027 1.038	0.991 1.003 1.000	1.000 1.007 1.003	1.070 1.047 1.062	1.086 1.075 1.080	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.049 1.024 1.038	1.051 1.028 1.041	0.000 0.000 0.000	1.064 1.056 1.062	1.035 1.021 1.034	0.965 0.968 0.965		
1.035 1.013 1.017	0.989 0.988 0.981	0.978 0.990 0.981	1.014 1.017 1.025	0.976 0.985 0.978	0.946 0.949 0.950	0.920 0.932 0.932	0.906 0.927 0.923	
0.961 0.973 0.963	0.957 0.973 0.962	0.963 0.972 0.962	0.967 0.971 0.963	0.946 0.963 0.954	0.933 0.951 0.943	0.922 0.944 0.935	0.920 0.947 0.933	0.930 0.970 0.947

그림 3. 독봉이 없는 핵연료집합체의 봉출력 분포비교 (연소초)

0.000 0.000 0.000								MCDEP HELIOS CASMO3
1.027 1.022 1.031	1.008 1.008 1.010							
1.025 1.022 1.031	1.011 1.008 1.010	1.013 1.009 1.010						
0.000 0.000 0.000	1.036 1.023 1.035	1.039 1.025 1.037	0.000 0.000 0.000					
1.040 1.021 1.030	1.005 1.008 1.009	1.009 1.011 1.011	1.053 1.034 1.043	1.034 1.040 1.035				
1.039 1.019 1.027	1.004 1.006 1.006	1.007 1.010 1.008	1.047 1.033 1.043	1.066 1.052 1.055	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.028 1.016 1.025	1.029 1.019 1.027	0.000 0.000 0.000	1.048 1.037 1.041	1.032 1.012 1.019	0.967 0.977 0.975		
1.028 1.007 1.010	0.985 0.993 0.989	0.982 0.994 0.989	1.014 1.009 1.014	0.976 0.990 0.985	0.949 0.963 0.962	0.938 0.949 0.947	0.923 0.943 0.938	
0.972 0.980 0.974	0.969 0.981 0.973	0.964 0.981 0.973	0.977 0.979 0.973	0.955 0.973 0.966	0.955 0.963 0.956	0.945 0.956 0.948	0.940 0.957 0.945	0.962 0.973 0.954

그림 4. 독봉이 없는 핵연료집합체의 봉출력 분포비교 (연소중)

0.000 0.000 0.000								MCDEP HELIOS CASMO3
1.162 1.152 1.158	1.095 1.116 1.110							
1.138 1.127 1.138	1.070 1.091 1.086	1.028 1.065 1.056						
0.000 0.000 0.000	1.074 1.069 1.092	1.017 1.023 1.030	0.000 0.000 0.000					
1.083 1.073 1.080	0.974 0.996 0.982	0.000 0.000 0.000	1.009 1.014 1.021	1.033 1.071 1.057				
1.081 1.052 1.070	0.994 0.998 1.007	0.952 0.969 0.955	1.050 1.032 1.061	1.097 1.095 1.105	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.047 1.014 1.043	0.986 0.987 0.992	0.000 0.000 0.000	1.064 1.038 1.059	0.981 0.986 0.993	0.918 0.928 0.944		
1.036 1.022 1.033	0.942 0.951 0.942	0.000 0.000 0.000	0.958 0.961 0.967	0.913 0.932 0.922	0.000 0.000 0.000	0.868 0.893 0.893	0.932 0.943 0.950	
0.985 0.964 0.981	0.967 0.937 0.959	0.894 0.905 0.904	0.938 0.915 0.941	0.919 0.909 0.934	0.876 0.888 0.892	0.920 0.919 0.942	0.970 0.967 0.982	1.029 1.000 1.017

그림 5. PYREX 독봉을 포함한 핵연료집합체의 봉출력 분포비교 (연소초)

0.000 0.000 0.000								MCDEP HELIOS CASMO3
1.045 1.038 1.039	1.023 1.024 1.019							
1.062 1.037 1.038	1.022 1.023 1.017	1.015 1.023 1.015						
0.000 0.000 0.000	1.038 1.037 1.042	1.039 1.039 1.045	0.000 0.000 0.000					
1.049 1.031 1.032	1.010 1.020 1.014	0.000 0.000 0.000	1.046 1.045 1.049	1.037 1.048 1.034				
1.043 1.026 1.027	1.016 1.014 1.008	1.015 1.017 1.010	1.045 1.040 1.044	1.055 1.057 1.052	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.017 1.020 1.024	1.014 1.021 1.026	0.000 0.000 0.000	1.030 1.039 1.038	1.004 1.009 1.014	0.962 0.970 0.970		
1.002 1.005 1.005	0.974 0.991 0.985	0.000 0.000 0.000	1.003 1.005 1.009	0.975 0.982 0.977	0.000 0.000 0.000	0.935 0.935 0.938	0.925 0.930 0.933	
0.958 0.967 0.969	0.958 0.968 0.970	0.951 0.965 0.966	0.971 0.962 0.967	0.952 0.954 0.958	0.937 0.941 0.946	0.942 0.935 0.943	0.954 0.936 0.942	0.974 0.946 0.953

그림 6. PYREX 독봉을 포함한 핵연료집합체의 봉출력 분포비교 (연소중)