

LCS-ORIGEN2 연결 프로그램 개발 및 활용

신희성, 신운철, 길충섭, 송태영, 유재권, 하석중, 박원석
한국원자력연구소

심형진
서울대학교

요 약

LCS와 ORIGEN2의 연결 프로그램 MONO를 개발하여 연소시간에 따른 가속기미입계로의 핵특성 변화를 분석할 있는 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템을 구축하였다. 몇 가지 타입의 미입계로를 대상으로 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 성능시험을 수행하였다. 용융염 핵연료 및 집합체형 핵연료 미입계로에 대한 계산은 문제없이 수행되었다. 또한 토륨/우라늄-233 핵연료 미입계로에 대한 연소시간에 따른 K_{eff} 변화는 외국기관의 계산결과와 유사하게 나타났다.

1. 서론

LCS(Lahet Code System)는 LAHET 코드와 HMCNP(혹은 MCNP) 코드로 구성되어 있다[1]. LAHET 코드는 하전 입자와 표적물질의 상호작용을 모사할 수 있고 MCNP 코드는 미입계로의 중성자 거동분석에 사용될 수 있기 때문에 LCS는 가속기미입계로의 핵특성 분석을 일괄적으로 수행할 수 있다. 그러나 LCS는 연소계산 기능이 없기 때문에 특정 시점의 핵특성 분석에만 사용가능하다. 이를 개선하기 위하여 LCS와 ORIGEN2의 연결 프로그램 MONO(Mcnp-Origen coupling program)를 개발하여 연소시간에 따른 핵특성 변화를 분석할 있는 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템을 구축하였다. MCNP와 ORIGEN을 연결하는 시도가 다른 나라에서도 있지만, 가속기미입계로의 핵특성 분석에 수정없이 사용하기는 힘들 것이다[2,3]. 이 논문에서는 MONO 개발내용을 설명하고 미입계로 핵특성 변화분석에 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 활용가능성을 확인하였다.

2. MONO 개발내용

2.1 개요

MONO는 LCS와 ORIGEN2 코드 자체를 수정하지 않고 한 코드의 출력자료를 다른 코드의 입력자료로 변환시켜 두 코드를 연결한다. 그림 1에 제시된 바와 같이 MONO는 세가지 프로그램, MODIF_MINP, MCNP_TO_ORG 및 ORG_TO_MCNP로 구성되었으며, 각각 MCNP 입력자료의 초기화, MCNP 출력자료로부터 ORIGEN2 입력자료 생산 및 ORIGEN2 출력자료로부터 MCNP 입력자료 생산 역할을 한다. 그림 2와 같이 이들 프로그램은 그래픽 환경에서 작업을 수행할 수 있다. 세 프로그램은 Fortran77 작성되었고, 사용자 그래픽환경은 C++로 작성되었다. LCS는 HP-Unix 버전을 사용하였고, ORIGEN2는 PC 버전을 HP-Unix로 컴파일하여 사용하였다. 현재 LCS-MONO-ORIGEN2는 HP workstation에서 사용되고 있다. MCNP 계산에서 사용할 수 있는 최대 연소셀수와 연소셀당 핵종수는 각각 100개와 300개다.

2.2 MODIF_MINP

MODIF_MINP에서는 사용자가 작성한 MCNP 입력자료를 수정/보완하여 초기화시킨다. 연소과정에서 변하는 인자는 연소셀 구성 핵종의 밀도와 연소셀의 총밀도다. 입력자료 변환을 편리하게 수행하기 위하여, 각 핵종의 밀도를 그램단위의 핵종량으로 표시하고 총밀도는 질량밀도로 표시한다. 또한 연소셀의 열출력 계산용 F6 tally와 핵단면적 생산용 F4 tally를 입력자료에 추가한다.

2.3 MCNP_TO_ORG

MCNP_TO_ORG는 MCNP의 출력자료로부터 ORIGEN2의 입력자료 및 1군 핵단면적을 생산한다. 각 연소셀별로 ORIGEN2 계산을 수행해야 하기 때문에 각 연소셀별로 별도의 입력자료와 라이브러리를 생산해야 한다. ORIGEN2의 입력자료 중에 연소과정에서 변하는 인자는 각 연소셀의 열출력과 연소셀 구성 핵종 및 핵종량이다. 열출력은 다음 두 가지 방법 중에서 사용자가 선택할 수 있다. 첫번째 방법은 사용자가 지정한 총열출력을 MCNP의 계산에서 얻은 셀별 열출력의 비율로 배분한 수정된 셀별 열출력을 사용하는 방법이다. 두번째 방법은 MCNP의 계산에서 얻은 셀별 열출력을 직접 사용하는 방법이다. 연소셀 구성 핵종 및 핵종량은 ORG_TO_MCNP에 의해 앞 연소사이클에서 결정된다.

연소사이클마다 1군 흡수단면적과 핵분열단면적을 생산하여 연소셀별로 새로운 1군 핵단면적 라이브러리를 만든다. 1군 핵단면적은 MCNP의 FM card 기능을 이용하여 MCNP 라이브러리의 핵단면적을 연소셀의 중성자 선속으로 가중 평균하여 얻는다.

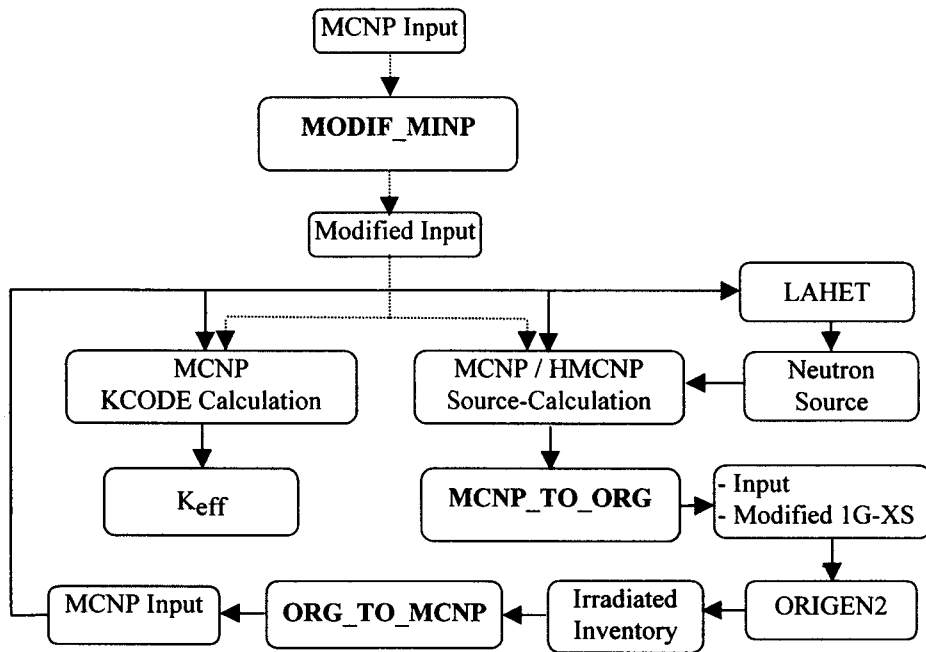


그림 1. LCS-MONO-ORIGEN2 Code System 의 작업 흐름도

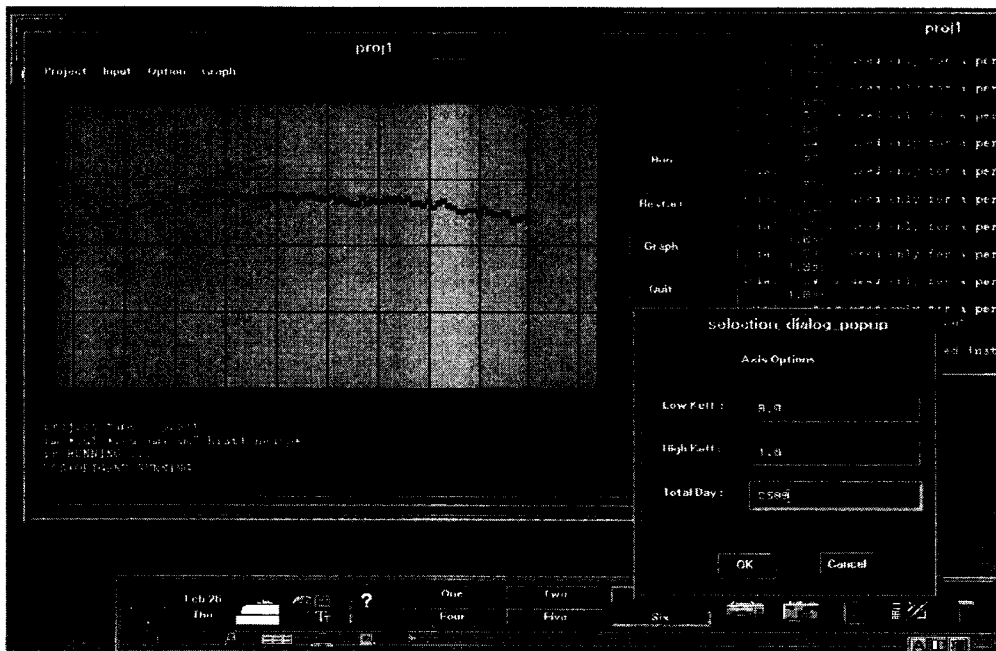


그림 2. LCS-MONO-ORIGEN2 의 그래픽 사용자 환경

2.4 ORG_TO_MCNP

ORG_TO_MCNP는 ORIGEN2의 출력자료에서 핵종량을 추출하여 MCNP의 입력자료를 생산한다. 연소사이클마다 핵분열생성물의 일부를 제거하고 마이너 악티나이드핵종을 주입하는 과정을 모사할 수 있다. ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am 과 ^{244}Cm 중에서 1개 핵종을 주입할 수도 있고, 사용후핵연료에 존재하는 비율로 네 핵종 모두 주입할 수도 있다.

ORG_TO_MCNP는 xsdir 파일을 읽어 사용할 핵종이 MCNP 핵자료 라이브러리에 포함되어 있는지 여부를 확인하고 포함된 핵종만 MCNP 입력자료에 포함시킨다. 포함되지 않는 핵종은 자세한 정보와 함께 별도의 파일로 저장된다. 연소계산이 끝난 후에 고려되지 않은 핵종을 확인할 수 있다.

ORIGEN2의 출력자료에는 보통 수백종의 핵종이 포함되기 때문에 이를 전부 MCNP의 입력자료에 포함시키는 것은 비효율적이다. 일부 핵종들은 반감기가 매우 짧고 핵종량도 매우 적기 때문에 MCNP에 의한 핵특성 분석에 미치는 영향이 미미하다. 흡수단면적과 핵분열단면적을 일정한 비율로 가중하여 합한 값에 원자수밀도로 곱한 값을 기여도라 정의하였다. ORIGEN2 출력자료에서 얻은 핵종들을 기여도 순으로 배열하여 사용자가 지정한 핵종수 만큼을 선택하여 MCNP 입력자료에 포함시킨다. 선택되지 않은 핵종의 양은 다음 세가지 방법 중에서 사용자가 선택한 방법으로 처리된다. 즉, 동위원소 중에서 질량수가 가장 비슷한 핵종에 합해 주는 방법, 질량수가 가장 가까운 원소에 합해 주는 방법 및 핵종량의 비율에 따라 나머지 핵종에 배분하는 방법이다. 사용자 지정 핵종수가 매우 크면 세 방법 모두 동일한 결과를 나타낼 것이다.

앞에서 설명한 바와 같이 MCNP의 계산에는 제한된 핵종만 고려하기 때문에 MCNP 출력자료의 핵종 및 핵종량을 기준으로 ORIGEN2의 입력자료를 만들면 연소가 진행됨에 따라 실제 핵종량과 차이가 점점 커질 수가 있다. 이점을 개선하기 위해서 ORIGEN2의 출력자료에서 얻은 핵종량을 핵연료 주입/제거 양만 보정하여 다음 사이클의 ORIGEN2의 입력자료에 사용한다.

3. LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 활용

3.1 기본입력자료 및 활용방법

MCNP 입력자료, coupling.dat 파일 및 lahetinp.dat 파일이 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템을 사용하는데 필요한 기본입력자료다. 계산 전에 사용자가 연소기간, 연소셀의 수, K_{eff} /고정선원 계산선택, 열/고속중성자형 선택 등을 결정하여 coupling.dat 파일에

입력해야 한다. 또한 연소셀별 셀번호, MCNP 계산에서 사용할 최대 핵종수와 1 군 핵단면적을 생산할 최대 핵종수를 핵종의 종류별(구조물 핵종, 악티나이드 핵종, 핵분열생성물 핵종)로 구분하여 입력해야 한다. LAHET 코드의 사용 시에는 양성자 이력수, 양성자 에너지, 빔 위치 및 빔 크기를 lahetinp.dat 에 입력해야 한다.

K_{eff} 계산과 고정선원계산을 각각 단독으로는 수행할 수 있고, 동시에 수행할 수도 있다. K_{eff} 단독계산에서는 1 군 핵단면적이 생산되지 않기 때문에 고정선원계산에서 생산한 단면적을 활용해야 한다. 또한 중성자 선원출처에 따라 LAHET 코드의 출력파일 neutp 을 사용하는 경우와 지정된 중성자 선원을 사용하는 경우로 구별된다. 후자의 경우에는 중성자 선원을 생산할 필요가 없기 때문에 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템에서 LAHET 코드를 제외한 MCNP-MONO-ORIGEN2 코드시스템으로 계산한다.

3.2 성능시험

핵연료 구성성분이 $64\text{NaCl}-2\text{PuCl}_3-34\text{MACl}_3$ 인 용융염 핵연료 미임계로를 대상으로 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 성능시험을 수행하였다[4]. 20 mA, 1 GeV 의 양자 빔과 700 MW 열출력을 가정하고, 연소간격, 연소사이클 및 연소시간을 각각 30 일, 100 번 및 3000 일로 정하여 연소계산을 수행하였다. 이때 K_{eff} 의 초기값은 0.86 이고 연소시간에 따라 증가하여 0.96 에 도달한 후 점점 감소하여 연소종료시점에서는 0.80 로 나타났다. 중성자 선원이 주어진 집합체형 미임계로를 대상으로 MCNP-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 성능시험을 수행하였다. 20 개의 연소셀과 셀당 핵종수가 115 개인 경우에 MCNP-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 사용가능성을 확인하였다.

3.3 토륨/우라늄-233 핵연료 미임계로[5]

그림 3 과 같은 토륨/우라늄-233 핵연료 미임계로 모형을 대상으로 IAEA 주관하에 검증계산을 수행한 바 있다. 모형의 중심에 중성자 선원이 균질하게 분포하고 에너지 분포함수가 주어졌다. K_{eff} 가 0.94 인 시점에서 출발하여 1500 MW 출력으로 2250 일간 연소하는 동안 K_{eff} 변화를 분석하는 검증계산과제다. MCNP-MONO-ORIGEN2 코드시스템을 사용하여 연소간격을 150 일로, 연소셀당 핵종수를 80 개로 선택하여 연소시간에 따른 K_{eff} 변화를 계산하였다. 그 결과를 그림 4 에서 4 개 기관의 계산결과와 비교하였다. 초기상태에는 서로 잘 일치하지만 연소종료시점에서는 크게 분산되는 것을 알 수 있다. 연소종료시점에서 우리의 계산결과는 약간 낮게 나타나는 편이지만, 다른 결과의 분산정도를 감안한다면 양호한 것으로 볼 수 있다. 다른 결과와 달리 연소시간에 따라 K_{eff} 의 기복이 나타난다. 이에 대한 원인규명을 위해 연소계산조건에 대한 민감도 분석이 필요하다

고 판단된다.

4. 결론

MONO 로 연결한 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템은 가속기미임계로의 핵특성 변화분석에 활용될 수 있음을 확인하였다. 앞으로 연소시간 간격과 연소셀당 핵종수에 대한 민감도 분석, 생산된 1 균 핵단면적의 신뢰도 분석, ORIGEN2 라이브러리의 핵분열 수율의 정확도 분석 등이 수행되어야 할 것이다. 또한 다양한 노형을 대상으로 검증계산을 수행하여 LCS-MONO-ORIGEN2 코드시스템의 신뢰도를 높여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. E. Prael and Henry Lichtenstein, "User Guide to LCS: The Lahet Code System," LA-UR-89-3014, Los Alamos National Laboratory (1989).
2. R. T. Perry, J. Wiley Davidson and Michael G. Houts, "MCNP-ORIGEN : An Instruction for Coupling," LA-UR-95-1993, Los Alamos National Laboratory (1993).
3. R. L. Moore, B. G. Schnitzler, C. A. Wemple, R. S. Babcock and D. E. Wessol, "MOCUP: MCNP-ORIGEN2 Coupled Utility Program ," INEL-95/0523, Idaho National Engineering Laboratory (1995).
4. 박원석 외, " 핵변환기술개발," KAERI/RR-1702/1996, 한국원자력연구소 (1997).
5. I. Slessarev, A. Tchistiakov, "IAEA - ADS Benchmark (Stage 1) Results and Analysis," TCM-Meeting, Madrid 17-19, Sept (1997)

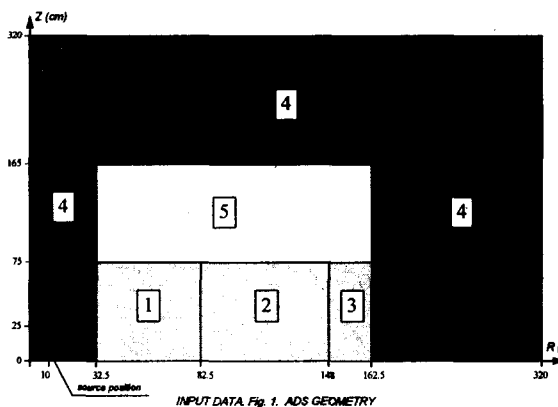


그림 3. 토륨/우라늄-233 핵연료 미임계로 모형

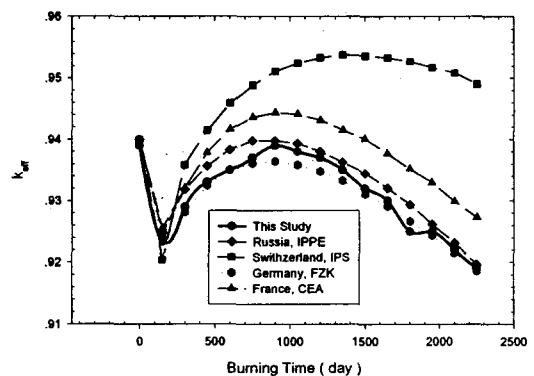


그림 4. 연소시간에 따른 K_{eff} 변화