

## HANARO에서의 Fission Mo 생산에 대한 불확실도 해석

### Uncertainty Analysis on Fission Mo Production in HANARO

조동건, 김명현

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리

#### 요 약

LEU 및 HEU를 사용하는 표적에 대해 Crude Monte Carlo Method를 이용하여 Fission Mo 생산에 관한 불확실도 해석을 수행하였다. 불확실도 해석 결과,  $^{99}\text{Mo}$  수율 및 생산량의 불확실도에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 HEU에 대해서는 없었으며, LEU에 대해서는 표적 연료 두께인 것으로 나타났다. 따라서,  $^{99}\text{Mo}$  수율 및 생산량의 불확실도를 줄이기 위해서는 표적 박막 두께 제조공정의 공차를 줄이는 것이 매우 중요한 것으로 나타났다. U.S.P.(United State Pharmacopoeia) 기준을 만족하기 위한 최소제염계수(Minimum Required Decontamination Factor : MRDF)에 대해서는 LEU 및 HEU 모두 전체적으로 불확실도가 매우 적은 것으로 나타났다. MRDF의 불확실도 평가결과, HEU에 대해서는 불확실도를 고려할지라도 알파방출체인 Pu의 분리에는 아무런 문제가 없음이 확인되었으며, LEU에 대해서는 현재의 Cintichem 화학처리 공정으로는 제염이 불가능하나, 불확실도가  $1\sigma$  수준에서 3%정도로서 매우 작아서 한 단계의 정제공정만 추가된다면 알파방출체인 Pu의 제염에 문제가 없을 것으로 평가되었다.

#### Abstract

Uncertainty analysis on fission-produced molybdenum production with low enriched uranium (LEU) and high enriched uranium(HEU) was performed using Crude Monte Carlo Method. The most important parameter affecting uncertainty of  $^{99}\text{Mo}$  yield and annul production amount was fuel thickness for LEU target. Therefore, it was important to minimize the fuel film fabrication tolerance for LEU target. Uncertainty of minimum required decontamination factor(MRDF) to satisfy U.S.P.(Unites States Pharmacopoeia) standard was very small for both target. Decontamination of Pu which is  $\alpha$ -emitter was shown to be impossible using current Cintichem process in LEU. However, it can be overcome by addition of one more purification step, because the uncertainty of MRDF was small within 3% for  $1\sigma$  confidence level.

## 1. 서론

Fission Mo 생산을 위해서는 우선적으로 표적의 설계가 이루어져야 하며, 설계안이 구성되면 이를 바탕으로 표적의 제조, 원자로 조사 및 화학처리 등 일련의 공정이 지속적으로 이루어져야 한다. 그런데, Fission Mo 생산공정에는 매우 많은 불확실도가 내재되어 있다. 각 공정별 불확실도를 정확히 알아야 Fission Mo 생산공정에서 품질관리(Quality Control) 절차를 개발할 수 있으며, 또한 불확실도가 매우 큰 공정은 이를 줄이기 위한 방안을 모색할 수 있다.

Fission Mo 생산공정과 관련하여 불확실도의 근원(source of uncertainty)을 살펴보면, 첫째, 표적 설계시 로물리 조건에 의해 불확실도가 존재한다. 이는 모델의 불확실성에 의해 기인하며, 또한, 설계시 원자로 조건을 정확히 고려할 수 없는데서 기인한다. 둘째, 기하학적 공차에 의해 불확실도가 존재한다. 이는 설계된 표적을 제원대로 정확히 제조할 수 없음으로 인해 존재하는 불확실도이다. 셋째, 표적을 구성하고 있는 물질 구성비 편차에 의해 불확실도가 존재한다. 이는 표적을 구성하고 있는 물질이 구성비 제원대로 정확히 제조될 수 없는 데서 존재하는 불확실도이다. 넷째, 화학처리 공차에 의한 불확실도가 존재한다. 이는 화학처리지 실험조건의 변화에 의해 기인하는 오차이다.

본 논문에서는 표적 제조시 공차, 원자로 조건변화, 표적재질의 구성비 편차 등에 의한 불확실도만을 고려하였으며, 모델의 불확실성에 의한 불확실도(code bias) 및 화학처리지 공차는 실험치와의 비교를 통해 산출해야 하므로 본 논문에서는 제외하였다. 불확실도 해석은 **하나로** 조사를 가정하여 고농축우라늄(High Enriched Uranium : HEU) 및 저농축우라늄(Low Enriched Uranium : LEU)을 사용하는 표적을 대상으로 수행되었으며,  $^{99}\text{Mo}$  생성수율( $\text{Ci}^{99}\text{Mo/gU}$ ), Pu 생산량, 연간  $^{99}\text{Mo}$  생산량 및 U.S.P. 기준을 만족하기 위한 최소제염계수(Minimum Required Decontamination Factor : MRDF)의 불확실도를 평가하여 Fission Mo 생산 공정 및 Pu의 제염 측면에서 LEU의 적용타당성을 평가하였다.

## 2. 불확실도 평가를 위한 표적 설계안

불확실도 평가를 수행하기 위해서는 최적화된 표적 설계안이 필요하다. 따라서, LEU 및 HEU 표적 각각에 대한 불확실도 해석을 수행하고자 각 표적에 대해 최적화를 수행하였다. 이를 바탕으로 평가된 불확실도 평가 대상 설계안은 다음과 같다.

### 2.1 HEU 표적 설계안

표 1 및 그림 1은 HEU 표적 설계안의 제원 및 단면도를 나타낸다. 이 설계안은 앞서 발표된 논문에서 여러 번 언급하였으므로[1,2] 상세한 언급은 본 논문에서는 생략하기로 한다. 이 설계안은 93w/o의 고농축 우라늄을 연료로 사용하고 있으며, 기존에 제시된 설계안[1]에 표적 이송용기 및 운전중 표적 입·출입장치와의 호환성을 증가시키고 반응도를 완화시켜 안전 여유도를 증가시킨 것이 특징이다.

### 2.2 LEU 표적 설계안

표 1 및 그림 2는 LEU 표적 설계안의 제원 및 단면도를 나타낸다. 이 설계안은 미국의 Argonne National Laboratory에서 전세계 Fission Mo 표적연료로써 LEU 금속연료를 공급하고자 개발중인 표적의 개념을 따르고 있다. 표적연료는 19.75w/o 우라늄 금속이며, 약  $100\mu\text{m}$ 두께의 박막으로 제조한 후 이를 알루미늄 피복재 사이에 끼운 형태이다. 표 1에서 제시한 설계안은 **하나**

로 원자로에 어느 정도 최적화된 설계안이며, 이 표적은 국내 수요를 공급할 수 있는 용량을 지니고 있다.

표 1 제안된 표적 설계안의 제원

Target Fuel	Axial Length (cm)	Target Cladding		Thickness( $\mu\text{m}$ )			U Loading (g/target)
		Outer Tube O.D.(cm)	Inner Tube I.D.(cm)	Clad.	Recoil Barrier	UO <sub>2</sub> Fuel	
HEU	15	4.32	-	800	10	10	3.786
LEU	10	4.400	4.088	1500	10	100	24.40

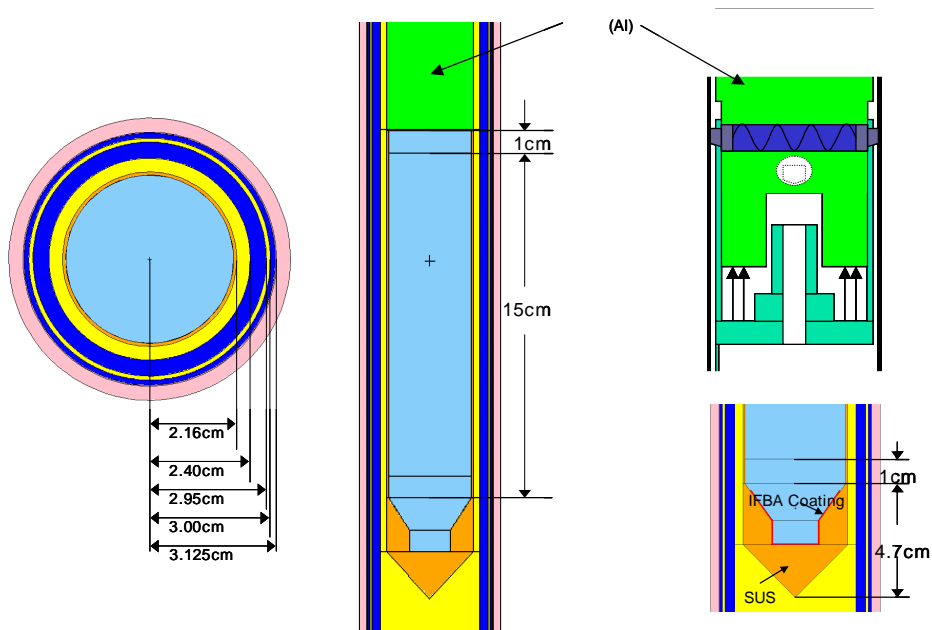


그림 1 HEU 표적 설계안의 제원 및 단면도

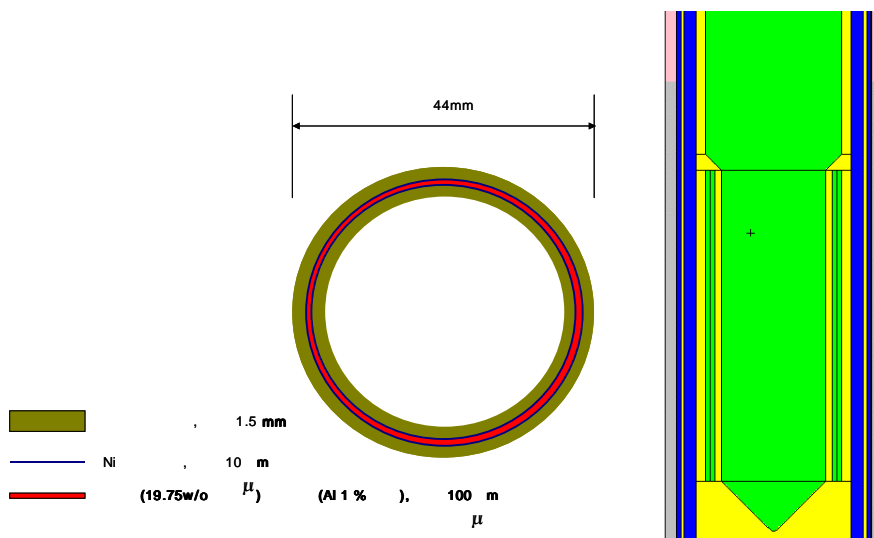


그림 2 LEU 표적 설계안

### 3. 불확실도 해석

본 연구에서의 불확실도 해석이란 입력변수의 변화에 의한 출력변수의 변화 정도를 평가하는 것이다. 여기서 입력변수란 표적 기하학적 공차, 원자로 조건, 표적 원료 물질 공차, 화학처리 공차 등을 의미하며, 출력변수란 이들의 변화에 의한 Mo-99 생성수율(Ci <sup>99</sup>Mo/gU), Pu 생성수율(Ci <sup>239</sup>Pu/gU), 화학처리시 최소제염계수(MRDF) 및 연간 Mo-99 생산량(Ci <sup>99</sup>Mo/gU) 등을 의미한다.

#### 3.1 입력변수 선정

불확실도 해석의 첫 단계로서 고려해야 할 각 입력변수를 산출하고, 입력변수의 분포를 실제 자료를 바탕으로 산출하였다. 대상 변수는 로물리 변수, 기하학적 공차 및 물질 구성비 편차 등이며, 여기서 로물리 변수에는 표적 설계시 전산체제로 사용되는 MCNP 코드의 원자로 모델링의 불확실성에 의한 오차와 원자로 실제 운전 조건 변화 등이 포함된다.

##### 3.1.1 로물리 변수

###### 가) 선원스펙트럼

Fission Mo 표적 설계시 MCNP 코드는 WIMS/VENTURE 코드 시스템을 통해 산출된 노심의 출력분포 및 핵종 수밀도를 이용해 고정선원(fixed source) 문제를 해석하였다. 임의의 핵연료 봉 셀(cell)  $i$ , 에너지 구간  $g$ 에 대해 정확히 중성자 선원을 발생시키려면 식 (3.1)에 존재하는 매개변수를 정확히 반영하여야 한다.

$$\begin{aligned} S_{ig} &= x_{ig}C_iP_i & (3.1) \\ &= x_{ig}(V/E_r)P_i \end{aligned}$$

여기서,  $i$  = fuel pin index,

$g$  = certain energy interval index,

$x_{ig}$  = fission source spectrum,

$P_i$  = node power,

$C_i(V/E_r)$  = power-to-source conversion factor, C factor,

$E_r$  = recoverable energy를 나타낸다.

이를 위해서는 식 (3.1)의  $x$ (fission source spectrum) 분포를 각 핵연료 영역(cell)별로 핵분열성 물질의 핵분열 반응률(fission reaction rate) 비를 고려하여 적용하여야 한다. 즉, 그림 3 및 4에서 보는 바와 같이 각 핵분열성 물질인 <sup>235</sup>U 및 <sup>239</sup>Pu의 U-235의 핵분열스펙트럼(fission spectrum)이 다르므로 각 영역별로 선원의 에너지 산출 시 이를 정확히 고려하여야 한다는 것이다. 그러나, 이는 불가능하며 따라서 이를 정확히 고려하지 못하는 데서 기인하는 불확실도를 평가하여야 한다.

###### 나) WIMS/VENTURE의 출력분포

각 영역별, 에너지 구간별로 정확히 중성자를 발생시키기 위해서는 식 (3.1)에 존재하는 핵연료 봉  $i$ 에서 발생하는 열출력 값, 즉 WENTURE 코드로부터 얻어지는 각 핵연료봉 영역에서의 열출력 값,  $P_i$ 를 정확히 반영해 주어야 한다. 그러나, VENTURE를 통해 계산된 열출력 값  $P_i$ 는 그 자체 계산 값이 불확실도를 갖는다. 따라서, WIMS/VENTURE의 출력분포의 불확실성에 의한 출력변수의 불확실도 평가가 필요하다.

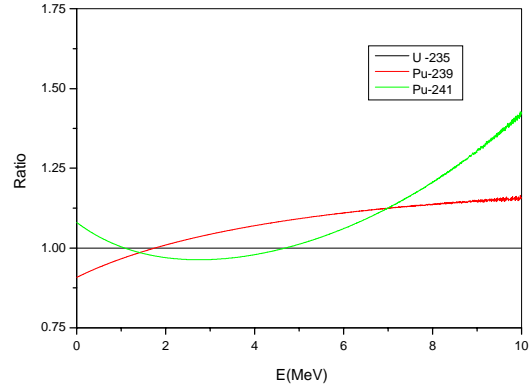
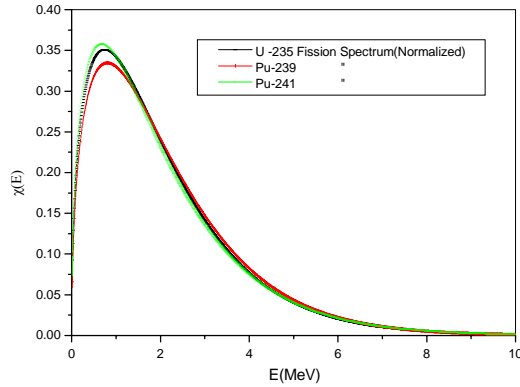


그림 3 Fission Spectrum of Fissile Nuclide 그림 4 Ratio of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Pu}$  Spectra to  $^{235}\text{U}$

#### 다) 표적내 핵분열성 물질의 감쇄

표적 핵설계 체계로 사용되는 MCNP/ORIGEN2 코드 시스템에서 핵종 생성량 평가시 5일간의 표적 조사기간 동안 표적내의 핵분열 반응률(fission reaction rate) 밀도는 일정하다고 가정하고 문제를 해석한다. 그러나, 실제로는 표적이 연소되어 핵분열성 물질이 감소하므로 원자로가 일정한 열출력을 낸다고 가정하면 표적내의 핵분열 밀도는 조사시간에 따라 감소할 것이다. 따라서, 이를 정확히 고려하지 못하는 데서 기인하는 불확실도의 평가가 필요하다.

#### 라) 원자로 출력준위의 변화

MCNP/ORIGEN2를 이용한 핵종량 평가시 원자로의 열출력은 일정하게 30MWt의 열출력을 낸다고 가정한다. 그러나, 원자로를 정확하게 30MWt 출력으로 유지할 수 없으며, 30MWt을 중심으로 유동하게 된다. 따라서, 이에 의한 출력변수의 변화가 예상된다.

### 3.1.2 표적의 기하학적 공차

앞서도 간략히 언급하였듯이 표적이 최적화된 제원대로 정확히 제조되지 않는다면 이로 인한 출력변수의 변화가 유발될 수 있다. 표 4.2는 제조 공차와 관련한 불확실도 입력변수들이 기재되어 있다. 표에서 보듯이 기하학적 공차로는 표적연료의 두께 및 길이변화와 피복재의 두께 및 길이변화 등을 들 수 있다.

### 3.1.3 물질 조성비 편차

표적에 사용되는 물질의 조성비 또한 최적설계안 평가 시 반영된 자료와 동일하게 제조되기는 매우 힘들다. LEU의 경우 19.75w/o로 제조되기를 원하지만 만일 이 값에서 벗어나게 된다면 역시 출력변수의 값은 우리가 기대하던 값에서 벗어나게 될 것이다.

## 3.2 Screening by Sensitivity Analysis

앞서 제시된 입력변수를 모두 고려하여 불확실도 해석을 수행하는 것은 매우 힘들다. 따라서, 첫 번째 단계로서 출력변수의 불확실도에 영향을 크게 미치지 않는 변수는 선별하여 제외하였다.

이를 위해서는 우선적으로 각 입력변수의 분포 산출이 필요한데, 선원스펙트럼을 적용하기 위한 각 영역별 핵분열성 물질 함유량 분포는 WIMS/VENTURE 계산결과의 각 영역별 핵종 존재량을 기준으로 산출하였다. 그림 5 및 6은 R01 및 SOR1 집합체의 각 핵연료 영역별 Pu 존재량

분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 핵분열성 물질이 분포는 특정한 분포를 가지지 않는 것으로 나타났다.

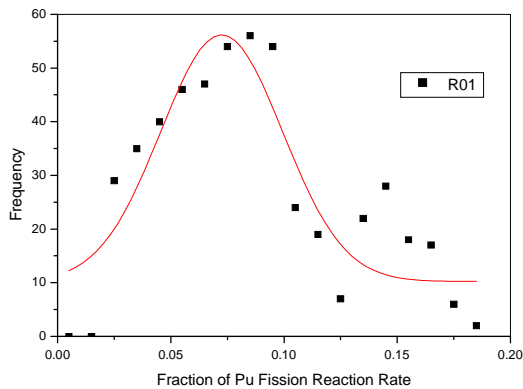


그림 5 R01 핵연료집합체에서의 Pu에 의한 핵분열 반응률 분포

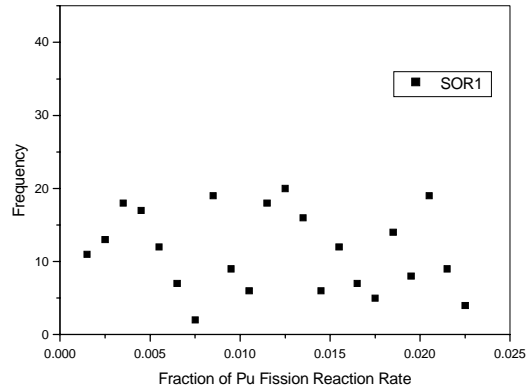


그림 6 CAR1 핵연료집합체에서의 Pu에 의한 핵분열반응률 분포

식 (3.1)의  $P_i$ 의 불확실성에 의한 불확실도 평가를 위한 입력변수 분포는 **하나로 안전성 분석보고서**의 자료로부터 산출하였다. 이 보고서에 의하면 **하나로**의 노심설계 전산코드로 계산한 핵연료집합체의 출력인자는 약 4.5%(1 $\sigma$ )의 불확실도를 가지고 있다. 즉, 각 집합체별로 평가된 열출력 값은 1 $\sigma$  수준에서 참값으로부터  $\pm 4.5\%$ 의 오차를 지닌다는 것을 의미한다. 원자로 출력준위의 오차는 실제 운전자료를 바탕으로 최소값을 30MWt의 97.4%, 최대값을 102.6%로 산출하였다. 식 (3.1)의  $x_i$  즉, 선원스펙트럼에 의한 불확실도 평가를 위한 각 영역별 핵분열성 물질의 분포는 정보이론에 의거한 최대엔트로피법칙(maximum entropy principle)으로부터 불확실도 분포를 보수적으로 평가하도록 만드는 균일분포(uniform distribution)를 가정하였으며, 출력인자의 분포는 정규분포를 갖는다고 가정하였다.

표 2 기하학적 공차를 갖는 입력변수 분포

		HEU			LEU		
		Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
Fuel	Thickness( $\mu\text{m}$ )	19	21	20	80	120	100
	Axial Length(cm)	14.5	15.5	15	9.5	10.5	10
Cladding	Thickness	700	900	800	-	-	-
	Axial Length	16.5	17.5	17	-	-	-
분 포		균일 분포			균일 분포		

표 3 표적 연료의 물질 구성비 입력변수 분포

Material	Concentration[w/o]					
	U-235			U-238		
	Min.	Max.	Median	Min.	Max.	Median
HEU	92.75	93.25	93.0	8.75	9.25	9.0
LEU	19.50	20.00	19.75	80.00	80.50	80.25
분 포	균일 분포			균일 분포		

표 2에는 기하학적 공차의 분포가 기재되어 있으며, 표 3에는 실제 제조경험 및 실측자료로부터 산출된 물질 구성비 편차의 분포가 기재되어 있다. 이들의 분포 또한 불확실도를 크게 만드는 분포인 균일분포를 가정하였다.

앞서 선정된 각각의 입력변수 분포를 바탕으로 입력변수 선별작업(screening)을 수행하였다. 선별방법으로 흔히 사용되는 방법으로는 1) subjective method, 2) sensitivity analysis, 3) one-at-a-time design, 및 4) rank order correlation 등이 있다.

주관에 의한 방법은 전문가의 판단에 의해 출력변수에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 입력변수를 불확실도의 근원 변수로서 제외하는 것이다. 따라서 이 방법은 매우 비과학적이어서 오류를 범하기 쉬워 첫 번째 선별과정에서 주로 사용한다. 본 연구에서 이 방법에 의해 제외된 입력변수로는 LEU 표적에서 AI 피복재의 두께 및 길이 변화와 AI 피복재의 구성비 편차 등을 들 수 있다. 왜냐하면 중성자 거동에 있어서 AI 피복재의 제조 공차와 구성비 편차에 의한 변화는 중요하지 않기 때문이다.

민감도 분석에 의한 방법은 입력변수가 갖을 수 있는 총 분포를 고려해서 입력변수의 일정 분율을 변화시킴으로서 출력변수의 변화율을 보고 입력변수의 불확실도 해석에서의 중요도를 평가하는 방법이다. One-At-A-Time Design은 민감도분석을 좀더 확장한 방법으로서 이 방법은 각각의 입력변수에 대해 평균값과 표준편차로부터 표준편차를 더하거나 빼서 계산을 수행하여 출력변수를 평가하고 이로부터 민감도 계수를 산정하여 중요도를 평가하는 것이다. 일단 민감도 계수를 산출하면 각 입력변수가 출력변수에 미치는 영향도를 쉽게 알 수 있으므로 불확실도 해석시 중요하지 않은 변수를 선별할 수 있다.

Rank Order Correlation의 방법으로 사용되는 방법으로는 Standardized Regression Coefficient(SRC) 및 Standardized Rank Correlation Coefficient를 이용하는 방법 등이 있다.  $SRC(Y, X_j)$ 는 Y에 대한 회귀식의 계수이며 식 (3.2)와 같은 형태를 갖는다.

$$Y^* = \sum_{j=1}^k SRC(Y, X_j) X_j^* \quad (3.2)$$

여기서,  $Y^*$  및  $X_j^*$ 는 각각  $Y^* = \frac{(Y - \bar{Y})}{S_y(Y)}$  와  $X_j^* = \frac{X_j - \bar{X}_j}{S_{X_j}(X_j)}$  로 표준화된 변수이며  $\bar{Y}$  와  $\bar{X}_j$ 는 각각 표본 추출된 입력변수 및 출력변수의 평균을 나타낸다.  $S_y(Y)$ 와  $S_{X_j}(X_j)$ 는 각각 출력변수 Y와 입력변수  $X_j$ 에 대한 표준편차를 나타낸다. 본 연구에서 SRC와 SRCC를 이용하여 기여도가 적은 변수를 선정하는 것은 불가능하며, 따라서 민감도 분석에 의한 선별 작업을 수행하였다. 이렇게 하여 불확실도 해석대상 입력변수에서 제외된 변수는 핵분열 선원스펙트럼(x), HEU에 사용되는 SUS 피복재의 물질 구성비 편차, 및 표적두께로 나타났으며, 이들 변화에 의한 Mo-99 생성량의 변화는 입력변수를 최대로 변화시켰음에도 불구하고 매우 작은 오차를 나타내므로 충분히 무시할 수 있었다. Pu 생성량에 변화 역시 매우 작은 결과를 나타내었다.

### 3.2 Crude Monte Carlo Method를 이용한 불확실도의 정량적 평가

앞서 선정된 입력변수만을 대상으로 불확실도 정량적 평가를 수행하였다. 불확실도 해석 방법론으로는 Crude Monte Carlo Method를 사용하였다. 이 방법은 그림 7에서 보는 바와 같이 각각의 입력변수에 대해 구간의 나눔이 없이 임의대로 임의추출(random sampling)하여 입력변수 셀(set)을 구성하고 이를 복잡한 수치적 모델에 직접 적용함으로써 출력변수의 분포를 구한다. 이 방법은 수많은 회수를 반복하면 비교적 정확한 출력변수의 분포를 얻을 수 있는 장점이 있으므로 검증계산 시 참값으로 사용되기도 한다.

그러나, 이 방법은 Monte Carlo Method의 일종이므로 불확실도가 어느 인자로부터 주요하게 기인하였는지를 알 수 없다는 것과 입력변수의 분포가 한 개라도 바뀔 경우에는 처음부터 불확실도 해석을 다시 수행해야 한다는 단점이 있다. 또한 수치적 모델이 계산시간이 많이 걸릴 경우 수많은 회수를 반복하기 위해서는 상당한 시간이 소요된다는 단점을 지니고 있다[4,5].

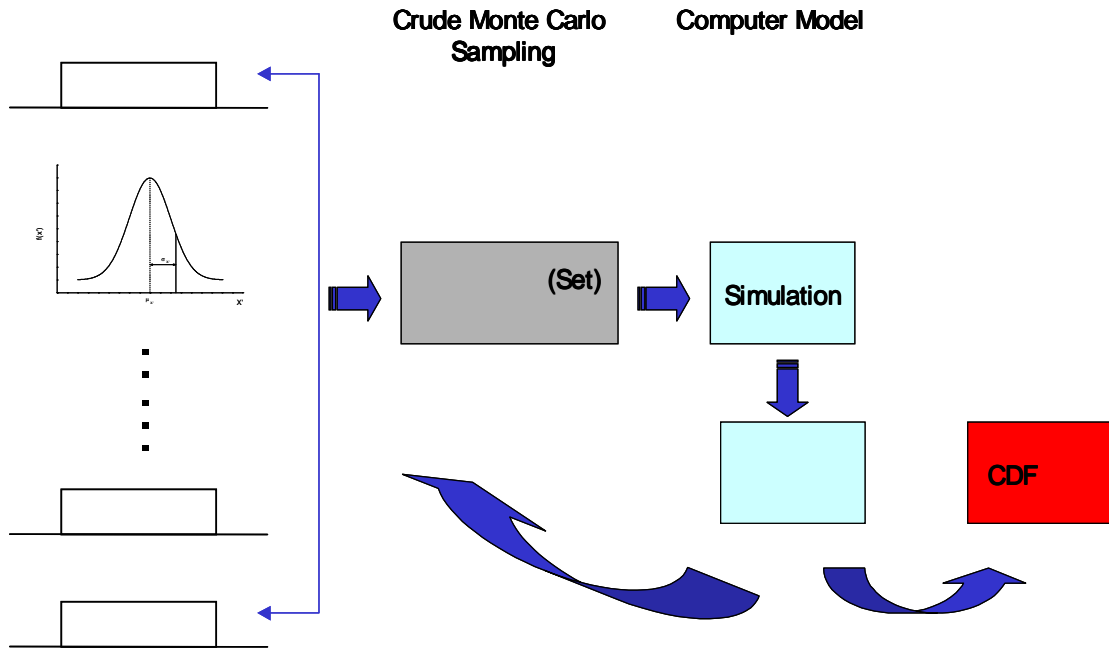


그림 7 Crude Monte Carlo Method

본 논문에서 입력변수 셀 구성시 WIMS/VENTURE의 침투 출력치의 표본추출은 표 4의 Permission/Rejection Method를 사용하였다. 이 방법은 각각의 집합체 출력인자가  $1\sigma$  수준에서 4.5%의 불확실도를 지니고 있으므로 이 분포로부터 각 집합체의 침투 출력치 값을 산출한 후 이를 각 집합체에 적용하여 선출력 밀도를 노심 평균 선출력 밀도로 만드는 분포만을 허용(permission)하여 입력변수 셀에 적용하는 것이다. 이 이론에 의하면 표 4에서 Case 2는 허용되지만 Case 1 및 3는 거절(rejection)된다.

이와 같은 방법을 통해 입력변수에 의한 출력변수 값이 산출되면, 각 입력변수는 통계적 오차를 갖는다. 각 출력변수의 신뢰구간은 통계적 오차를 가중하여 식 (3.3)에 의해 처리하였다.

$$\bar{C} - T_{95,95} S_c \leq X \leq \bar{C} + T_{95,95} S_c \quad (3.3)$$

여기서,  $\bar{C} = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{C_i}{S_{C_i}^2}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{S_{C_i}^2}}$ ,  $S_c = \frac{n}{n-1} \left( \frac{\sum_{i=0}^n \left( \frac{C_i}{S_{C_i}} \right)^2}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{S_{C_i}^2}} - \bar{C}^2 \right)$  이며,

$T_{95,95}$ 는 Two-Sided Tolerance Limit Factor[3]를 나타낸다.



표 4 Permission/Rejection Sampling Chart

Variable Sampling Set	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	~	X <sub>k</sub>	$\frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k X_{ij}$
#1	X <sub>11</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>31</sub>	-	X <sub>kn</sub>	$1.015 \times \bar{P}$
#2	X <sub>12</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>32</sub>	-	X <sub>k4</sub>	$1.000 \times \bar{P}$
#3	X <sub>13</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>33</sub>	-	X <sub>k3</sub>	$0.998 \times \bar{P}$
~	-	-	-	-	-	~
#n	X <sub>1n</sub>	X <sub>2n</sub>	X <sub>3n</sub>	-	X <sub>k2</sub>	$0.996 \times \bar{P}$

Crude Monte Carlo Method가 각 입력변수에 대한 불확실도의 중요도를 산출할 수 없으므로 총 불확실도 산출에 앞서 각 인자에 대한 불확실도 해석을 수행하였다.

LEU 및 HEU 표적에 대해 각 입력변수에 대한 불확실도 해석으로부터 얻어진 결과를 언급하면 다음과 같다.

- 1) HEU에 대해서는 Mo-99 수율 및 생산량에 큰 영향을 미치는 변수는 없었으며, MRDF에 대해서는 불확실도의 근원이 WIMS/VENTURE의 출력분포, 핵연료의 연소도 등인 것으로 나타났다
- 2) LEU에 대해서는 Mo-99 생성수율 및 연간 생산량에 대해서는 불확실도의 근원이 대부분 표적 연료 두께인 것으로 나타났으며, MRDF 측면에서는 WIMS/VENTURE의 출력분포 및 표적 연료두께에서 기인하는 것으로 나타났다.
- 3) 그러나, MRDF에 대해서는 LEU 및 HEU 모두 전체적으로 불확실도가 매우 적은 것으로 나타나 불확실도의 근원을 특별히 선별할 필요성이 없는 것으로 나타났다.

표 5에는 HEU 및 LEU에 대한 모든 입력변수에 의한 불확실도 평가 결과가 기재되어 있다. 이를 바탕으로 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 4) HEU에 대해서는 MRDF 값의 95% 신뢰구간은 179~237로 나타났으며, 이미 상용화된 HEU는 불확실도를 고려할 지라도 Pu의 분리에는 아무런 문제가 되지 않음을 확인하였다.
- 5) 또한, 현재의 제조 기술 및 원자로 조건을 근거로 산출된 Mo-99 및 연간 생산량의 불확실도는 매우 1σ 수준에서 각각 3% 및 4.4%를 나타내 각각 5% 및 9%를 나타내는 LEU에 비해 매우 적어서 유리한 것으로 나타났다.
- 6) LEU에 대해서는 앞서 언급한 것처럼 두께에 의한 Mo-99의 수율 및 생산량의 불확실도가 커서 이 변수에 대한 불확실도가 HEU에 비해 크게 나타났으며, MRDF 측면에서는 95% 신뢰구간을 적용할 때, 4777~5645으로 나타나 현재의 Cintichem 화학처리 공정으로는 Pu의 제염이 전혀 불가능한 것으로 평가되었나, 그러나, 1σ 수준에서의 불확실도가 약 3%정도로서 매우 작아 한 공정당 Pu의 제염계수(Decontamination Factor)를 10으로 가정할 경우 정제단계 한 공정만 추가된다면 LEU 역시 알파방출체의 제염에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 경제성만 극복할 수 있다면 LEU의 사용도 타당할 것으로 판단된다.

표 5 모든 입력변수에 의한 불확실도 해석 결과

표적	출력변수	평균	표준편차	2.5% 값	97.5% 값	Relative Error (2σ level, %)
HEU	<sup>c</sup> Mo-99 (Ci/gU)	145.173	4.393	134.708	155.638	6.1
	<sup>c</sup> Pu-239 (Ci/gU)	3.0342E-6	1.9735E-7	2.5641E-6	3.5043E-6	13.0
	<sup>c</sup> MRDF (10 <sup>-7</sup> Ci-Pu)/(mCi <sup>99</sup> Mo)	207.705	12.116	178.844	236.565	11.7
	<sup>R</sup> Mo-99 (Ci/gU)	31.9978	0.9346	29.695	34.300	5.8
	<sup>R</sup> 연간생산량(Ci <sup>99</sup> Mo/yr)	3853.39	169.14	3450.49	4256.30	8.8
LEU	<sup>c</sup> Mo-99 (Ci/gU)	31.606	1.548	27.919	35.294	9.8
	<sup>c</sup> Pu-239 (Ci/gU)	1.6342E-5	1.2474E-6	1.3371E-5	1.9313E-5	15.2
	<sup>c</sup> MRDF (10 <sup>-7</sup> Ci-Pu)/(mCi <sup>99</sup> Mo)	5210.92	182.24	4776.81	5645.02	7.0
	<sup>R</sup> Mo-99 (Ci/gU)	6.9661	0.3413	6.1531	7.7790	9.79
	<sup>R</sup> 연간생산량(Ci <sup>99</sup> Mo/yr)	5168.47	459.263	4074.51	6262.44	17.8

<sup>c</sup> : 화학처리시점의 출력변수 산출치, <sup>R</sup> : 6-day reference 시점의 출력변수 산출치

#### 4. 결론

LEU 및 HEU를 사용하는 표적의 성능에 대해 Crude Monte Carlo Method를 이용하여 불확실도 해석을 수행하였다. Mo-99 수율 및 생산량의 불확실도에 큰 영향을 미치는 변수는 HEU에 대해서는 없었으며, LEU에 대해서는 불확실도의 근원이 대부분 표적 연료 두께인 것으로 나타났다. 따라서, LEU의 경우 Mo-99 수율에 대한 불확실도를 줄이기 위해서는 표적 박막 제조공정의 정밀도를 높여야 한다. MRDF에 대해서는 LEU 및 HEU 모두 전체적으로 불확실도가 매우 적은 것으로 나타나, 불확실도의 근원을 특별히 선별할 필요성이 없는 것으로 나타났다. 모든 입력변수에 의한 MRDF의 불확실도는 HEU에 대해서는 불확실도를 고려할 지라도 Pu의 분리에는 아무런 문제가 되지 않음을 확인하였으며, LEU에 대해서는 현재의 Cintichem 화학처리 공정으로는 Pu의 제염이 전혀 불가능한 것으로 평가되었다. 그러나, 1σ 수준에서의 불확실도가 약 3%정도로서 매우 작아 정제단계 한 공정만 추가된다면 LEU 역시 알파방출체의 제염에는 문제가 없을 것으로 확인되었다. 따라서, 경제성만 확보된다면 LEU의 적용은 타당할 것으로 판단된다.

#### Acknowledgements

본 연구는 '2002년도 한국원자력연구소 위탁연구과제로 수행되었음을 밝히며, 자료를 제공해주신 박진호 박사님과 이 병철 과제책임자님의 도움에 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCE

1. 조동진 외, "Fission Moly 표적 장전에 대한 하나로 노심 영향도 평가," 2001 춘계학술발표회 논문집, 2001.
2. 김명현 외, "하나로에서의 Fission Moly Target에 대한 핵적 안전성 연구," KAERI/CM-4501/2000, 한국원자력연구소, 2000.
3. Robert E. Odeh, "Tables for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans, and Screening," Marcel Dekker, Inc, 1980.
4. Moon-Hyun Chun, et al, "A Combined Procedure of RSM and LHS for Uncertainty Analyses in Source Term Quantifications Using MAAP3.0B," *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 23, pp. 1337-1349, 1996.
5. Neil D. Cox, "Comparison of Two Uncertainty Analysis," *Nucl. Sci. Eng.*, Vol. 64, pp. 258-265, 1977.