

## 평형핵연료주기의 경제성분석

권은하, 고원일

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

kwoneh@kaeri.re.kr

핵연료주기의 경제성은 향후 원자력발전에서 고려되어야 할 필수적인 요소 중의 하나이다. 원자력산업계에서도 경쟁원리가 중요시되고 있는 현실을 감안하면, 경제성은 특정 핵연료주기를 선택하는 중요한 결정요인이 된다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 향후 우리나라에 적용가능한 네가지의 핵연료주기 시나리오, 즉 첫째 PWR 사용후핵연료를 중간저장한 후 재활용하지 않고 영구 처분하는 '직접처분주기', 둘째 PWR 사용후핵연료를 DUPIC 핵연료로 가공하여 CANDU에서 재사용하고 DUPIC 사용후핵연료는 영구처분하는 'DUPIC 핵연료주기', 셋째 PWR 사용후핵연료를 습식재처리(PUREX)한 후 분리된 플루토늄은 MOX 핵연료로 가공하여 PWR에 재사용하고 MOX 사용후핵연료는 영구처분하는 '열중성자 재활용주기', 넷째 고온전해분리(pyroprocessing)를 통하여 금속핵연료를 만들어 고속로(SFR)에서 재사용하면서 고독성 핵종을 소멸시키는 'GEN-IV 핵연료주기'를 분석하였다.

먼저 핵연료주기를 구성하는 각 단계별 비용단가를 가정하여 계산하였으며, 불확실성 분석을 위하여 Latin Hypercube 추출방식을 적용한 몬테카를로 시뮬레이션방법을 적용하였다. 또한, 각 단계별 비용 중 변동성이 크다고 생각되는 우라늄가격, 고온전해분리 공정가격, 금속핵연료 제조 가격에 대해서는 민감도분석을 수행하였다.

다음 표 1은 본 연구에서의 경제성분석을 위하여 적용한 항목별 단가이다. 주로 OECD/NEA 자료[1]를 이용하였으나, 동 자료에 나와 있지 않은 가격의 경우에는 엔지니어링 판단값을 적용하였다. 우라늄의 경우에는 최근 급격히 상승하고 있는 가격을 고려하여 기준값 \$150, 하한값 \$50, 상한값 \$300으로 가정하였다. 고온전해분리(pyroprocessing) 공정은 아직 연구개발단계에 있으므로 정확한 가격을 산정하기는 어려우나, 엔지니어링 판단을 적용하여 고속로용 금속핵연료 처리의 경우 1,700\$/kgHM, 산화물핵연료의 전해정련인 경우 1,200\$/kgHM을 기준값으로 사용하였으며, 금속핵연료 제조비용은 2,000\$/kgHM을 기준값으로 사용하였다. 각 항목의 기준값을 이용하여 각각의 핵연료주기 비용을 계산한 결과, 직접처분주기 6.66 Mills/kWh, DUPIC 핵연료주기 6.45 Mills/kWh, 열중성자 재활용주기 7.35 Mills/kWh, GEN-IV 핵연료주기 6.81 Mills/kWh로 나타났다.

불확실성 분석을 위하여 몬테카를로 시뮬레이션방법을 적용하였는데, 각각의 비용단가가 최소값(a), 최대값(b) 및 최빈값(m)으로 구성된 다음과 같은 삼각분포(triangular distribution)를 따른다는 가정하에서 총 5,000번의 Latin Hypercube 추출을 수행하였다. 삼각분포는 대표적인 비모수

표 1 경제성 평가를 위한 적용단가

항목	단위	기준값	하한	상한	
우라늄	\$/kgU	150	50	300	
플루토	\$/kgU	5	3	9	
농축	\$/SWU	100	80	120	
제처리비용	UO <sub>2</sub> PUREX	\$/kgHM	800	700	900
	UO <sub>2</sub> Pyro (reduction/refining)	\$/kgHM	1,200	600	2,000
	SFR Metal Fuel Pyro	\$/kgHM	1,700	1,000	2,500
	UO <sub>2</sub> Fuel	\$/kgHM	250	200	300
제조비용	MOX Fuel	\$/kgHM	1,250	1,000	1,500
	DUPIC Fuel	\$/kgHM	700	500	900
	SFR Metal Fuel	\$/kgHM	2,000	1,000	3,000
	DUPIC S/P Dry Storage	\$/kgHM	150	120	230
저장비용	UO <sub>2</sub> S/P Dry Storage	\$/kgHM	150	120	230
	MOX S/P Dry Storage	\$/kgHM	350	240	460
	UO <sub>2</sub> PUREX HLW Dry Storage	\$/m <sup>3</sup>	120,000	80,000	200,000
	UO <sub>2</sub> PYRO HLW Dry Storage	\$/m <sup>3</sup>	120,000	80,000	200,000
처분비용	SFR Pyro HLW Dry Storage	\$/m <sup>3</sup>	120,000	80,000	200,000
	LILW (short lived)	\$/m <sup>3</sup>	2,000	1,200	3,000
	LILW (long lived)	\$/m <sup>3</sup>	6,000	4,000	8,000
	Packing (PWR SF)	\$/kgHM	350	250	500
	Packing (MOX SF)	\$/kgHM	625	375	750
	Packing (DUPIC SF)	\$/kgHM	300	230	400
Spent Fuel (underground cost)	\$/m <sup>3</sup>	1,200	600	2,000	
HLW (underground cost)	\$/m <sup>3</sup>	1,200	600	2,000	

분포(non-parametric distributions)로서 데이터가 많지 않으며 이에 대한 정확한 분포를 알 수 없는 경우에 효과적이다. 주로 엔지니어링 판단에 의하여 분포를 추정한다[2, 3].

$$f(x) = \frac{2(x-a)}{(m-a)(b-m)} \quad \text{for } a \leq x \leq m \dots\dots\dots (1)$$

$$f(x) = \frac{2(b-x)}{(b-m)(b-a)} \quad \text{for } m \leq x \leq b \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{mean} = \frac{(a+m+b)}{3} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{standard deviation} = \left( \frac{a^2 + b^2 + m^2 - ab - am - bm}{18} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (4)$$

몬테카를로 시뮬레이션 결과, 핵연료주기 비용에 대한 표준편차(SD)는 0.66 ~ 1.08 mills/kWh 범위로 나타났다. 즉, GEN-IV 핵연료주기와 직접처분주기의 차이인 0.15 mills/kWh는 GEN-IV 핵연료주기의 표준편차 0.81 mills/kWh, 그리고 직접처분주기의 표준편차 1.08 mills/kWh보다 작게 나타났음을 알 수 있다. 따라서, 이는 GEN-IV 핵연료주기의 비용이 직접처분주기의 오차범위내에 존재한다고 해석될 수 있다.

표 2 몬테카를로 시뮬레이션 결과

	직접처분주기	DUPIC 핵연료주기	열중성자 재처리주기	GEN-IV 핵연료주기
Min	4.36	4.89	5.31	4.76
Max	10.11	8.75	10.44	9.86
Mean	7.04	6.68	7.70	7.18
SD	1.08	0.66	0.96	0.81
Median	6.97	6.64	7.64	7.16

또한, 본 연구에서는 각 단계별 비용 중 변동성이 크다고 생각되는 우라늄가격, 고온전해분리 공정가격, 금속핵연료 제조가격에 대해서 민감도분석을 수행하였는데, 다중회귀민감도 (multi-variate stepwise regression) 방법을 적용하였다. 이 방법은 다중의 입력자료들에 대한 민감도를 평가하는 데에 적합하며, 회귀계수값(regression coefficient)을 산출하여 민감성 정도를 판단하게 된다. 회귀계수값이 1이면 입력변수의 1SD를 변화시킬 때의 결과가 1SD 만큼 변한다는 의미이다. 반대로, 회귀계수가 0이면 입력변수가 최종결과(output)에 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다.

분석결과, 전체적으로 우라늄가격이 가장 민감한 것으로 나타났다. 직접처분주기, DUPIC 핵연료주기 및 열중성자 핵연료주기에서의 우라늄가격의 회귀계수값은 약 0.95 ~ 0.99 범위에서 결정되었다. 그러나, GEN-IV 핵연료주기에서의 우라늄가격의 회귀계수값은 0.82를 보임으로써 GEN-IV 핵연료주기에서는 상대적으로 우라늄가격의 민감한 정도가 낮게 나타났다. 두 번째 민감성을 보이는 항목은 우라늄농축으로 나타났으나, GEN-IV 핵연료주기에서는 우라늄가격보다 고온 전해분리비용, 금속핵연료 제조비용 등이 농축비용보다 더 민감한 것으로 나타났다.

참고자료

[1] OECD/NEA, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, 2006.  
 [2] M. EVANS, N. HASTINGS and B. PEACOCK, Statistical Distribution (2nd Edition), pp. 31-37, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1993.  
 [3] A. SALTELLI and J. MARIVOET, "Performance of Non-parametric Statistics in Sensitivity Analysis and Parameter Ranking," EUR-10851, Commission of the European Communities, 1987.