

MOX 연료주기의 경제성분석

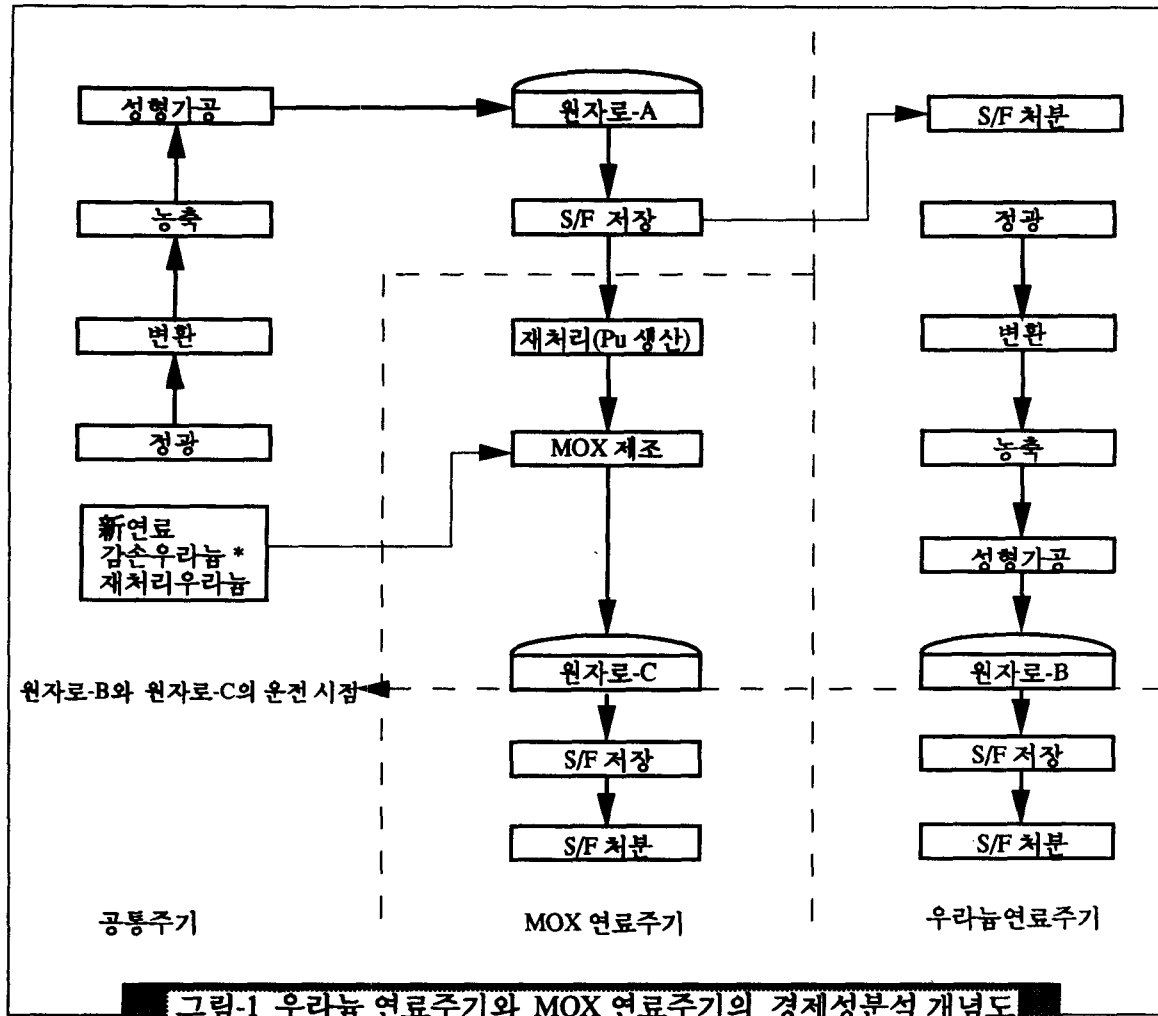
문 기 환
한국원자력연구소

요 약

MOX 연료는 PWR, BWR, FBR 및 ATR 등과 같은 다양한 노형에서 이용이 가능하다. 이와 같은 MOX 연료는 이미 일부 국가에서 이들 노형에 이용하고 있으며, FBR의 상용화 시기가 다소 지연될 것으로 예상되어 이 분야에 대한 연구는 더욱 활발히 진행될 전망이다. 여기에서는 이와 같은 현실을 감안하여 MOX 연료를 이용하는 MOX 연료주기와 우라늄 연료만을 이용하는 우라늄 연료주기에 대한 핵연료주기비를 비교·분석하였고, 그 결과 MOX 연료주기와 우라늄 연료주기의 경제성은 거의 대등한 것으로 평가되었다. 또한 우라늄 가격, 사용후핵연료 처분시기, 처분비용/재처리비용 등의 주요 변수에 대한 민감도분석을 수행한 결과, MOX 연료주기가 우라늄 연료주기에 대해 상당한 경쟁력을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

1. 대안 설정

우리나라의 후행핵연료주기 전략은 사용후핵연료의 직접처분 또는 재이용의 문제로 귀결된다고 볼 수 있다. 이와 같은 이유 때문에 여기에서는 사용후핵연료의 평화적 이용을 전제로 PWR에 장전되는 MOX 연료의 경제성을 분석하기 위해, 그림-1과 같이 MOX 연료주기와 우라늄 연료주기 등 두가지 대안을 설정하였다. 여기에서 MOX 연료주기는, 원자로-A의 운전을 통해 발생한 사용후핵연료를 15년(5년간 중간저장 기간 포함) 후에 재처리를 하고 여기에서 얻어진 Pu과 감손우라늄을 이용하여 MOX 연료를 제조한 후, 이 연료를 MOX를 이용하는 원자로-B에 장전하여 운영하는 것을 말한다. 이에 대응하는 우라늄 연료주기는, 원자로-A와 원자로-B가 하나의 주기를 형성하는 MOX 연료주기와는 달리, 원자로-A와 원자로-B가 투입되는 동일한 시점에서 원자로-A와 원자로-C가 독립적으로 운전되는 것으로 가정하였다. 다만, 여기에서는 MOX 연료주기와 우라늄 연료주기의 물량흐름(Mass Balance)은 같은 조건으로 하였고, 원자로-A와 원자로-B 및 원자로-C는 동일한 PWR Type 이지만 원자로-B의 경우는 MOX 연료가 장전된다는 차이점만 있을 뿐이다.



2. 주요 입력자료

우라늄 연료주기 중 정광, 변환, 농축, 성형가공 등 선행핵연료주기의 비용자료는 한전에서 전 원계획 수립시 적용한 자료를 이용하였고, 나머지 후행핵연료주기의 비용자료는 OECD/NEA 보고서(참고문헌 8)를 참조하였다. 단지, 사용후핵연료 처분비의 경우, 현재 한전에서는 매년 이 비용 명목으로 542,100원/kgU (670 \$/kgU)을 총당금으로 적립해 오고 있기 때문에 여기에서는 이 비용을 우라늄 연료주기와 MOX 연료주기에 똑같이 적용하였다. 사용후핵연료 저장비의 경우도 우라늄 연료주기와 MOX 연료주기가 같은 것으로 가정하였다. 핵연료주기 요소에 대한 각 공정의 발생시점을 나타내는 Lead & Lag Time은 OECD/NEA 보고서(참고문헌 8)를 참조로 하였다. 표-1에 나타난 Lead & Lag Time은 원자로-A의 연료장전 시점을 기준으로 한 누적치이며, 노내 연소 기간은 제외된 수치를 의미한다. 한편 MOX 연료와 우라늄 연료를 제조하기 위한 물량손실이 우라늄 연료의 변환 공정에서 0.5%, 성형가공 공정에서 1%, 재처리와 MOX 제조공정에서 각각 2%, 1% 발생하는 것으로 가정하였다. 할인율의 경우는 한전에서 전원계획 수립시 적용한 8.5%를 이용하였고, 모든 비용은 1994년 1월 1일 가격으로 계산하였다.

표-1 주요 입력자료

핵연료주기 요소		비용 자료		Lead & Lag Time (개월)	손실율 (%)
		단 위	비 용		
원자로 (A)	정광	\$/kgU	54.3	-24	
	변환	\$/kgU	4.7	-18	0.5
	농축	\$/SWU	112.0	-12	
	성형가공	\$/kgU	250.0	-6	1.0
	사용후핵연료 저장	\$/kgHM	230.0	+60	
	사용후핵연료 처분	\$/kgHM	670.0	+180	
원자로 (B)	정광	\$/kgU	54.3	+60	
	변환	\$/kgU	4.7	+66	0.5
	농축	\$/SWU	112.0	+72	
	성형가공	\$/kgU	250.0	+78	1.0
	사용후핵연료 저장	\$/kgHM	230.0	+144	
	사용후핵연료 처분	\$/kgHM	670.0	+264	
원자로 (C)	재처리	\$/kgHM	770.0	+60	2.0
	MOX 제조	\$/kgHM	800.0	+78	1.0
	재처리폐기물 처분	\$/kgHM	90.0	+180	
	MOX 사용후핵연료 저장	\$/kgHM	230.0	+144	
	MOX 사용후핵연료 처분	\$/kgHM	670.0	+264	
기술자료	○ 연소도 : 43,000 MWD/MTU ○ 농축도 : 3.7 % ○ 노내연소 기간 : 4년 ○ 폐기농도 : 0.225%				
일반자료	○ 합인율 = 8.5 %/년 ○ 환율 : 809.3 원/\$ ○ 가격기준년도 = 1994. 1. 1				

주 1) 원자로 A, B, C의 Lead/Lag Time은 원자로 A의 핵연료 장전 시점 기준임(노내 연소기간은 포함안됨)
 2) 우라늄연료주기 = 원자로(A) + 원자로(B), MOX 연료주기 = 원자로(A) + 원자로(C)

3. 분석결과

본 연구에서는 현재 국제적으로 가장 널리 이용되고 있는 불변가격의 평준화핵연료주기비 (Levelized Fuel Cycle Cost)를 이용하여 경제성분석을 수행하였다. 표-2는 우라늄 연료주기와 MOX 연료주기의 평준화 핵연료주기비의 결과이며, 여기에 나타난 바와 같이 두 대안의 경제성은 거의 대등한 것으로 나타났다.

표-2 우라늄 연료주기와 MOX 연료주기의 핵연료주기비 결과

핵연료주기 요소		핵연료주기비 (mills/kWh)	
		우라늄 연료주기	MOX 연료주기
공통주기	정광-A	1.47	1.47
	변환-A	0.12	0.12
	농축-A	2.14	2.14
	성형가공-A	0.83	0.83
우라늄 연료주기	사용후핵연료 저장-A	0.33	-
	사용후핵연료 처분-A	0.43	-
	정광-B	0.09	-
	변환-B	0.01	-
	농축-B	0.14	-
	성형가공-B	0.05	-
	사용후핵연료 저장-B	0.13	-
	사용후핵연료 처분-B	0.17	-
MOX 연료주기	재처리-C	-	1.11
	재처리폐기물처분-C	-	0.01
	MOX 제조-C	-	0.17
	사용후핵연료 저장-C	-	0.03
	사용후핵연료처분-C	-	0.04
핵연료주기비 계		5.9187	5.9201
상대적 경제성 (%)		100.00	100.02

주) A, B, C는 연료가 장전되는 원자로를 의미함.

4. 민감도분석

본 연구에서는 MOX 연료의 가치를 자원고갈, 폐기물발생량, 정책 등 세가지 측면에서의 민감도분석을 수행하였다. 자원고갈 측면은, MOX 연료가 이용되면 실제적으로 천연 우라늄의 사용이 줄어들게 되는 효과가 있고, 이는 정광가격에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 이에 대한 변화 효과를 분석하였다. 폐기물발생량 측면의 경우는, 연료의 노내 연소후 발생한 사용후핵연료를 처분하느냐 재처리하여 MOX 연료로 재이용하느냐에 따라 처분해야할 사용후핵연료의 양이 영향을 받기 때문에 이들 비용의 변화에 따른 영향을 분석코자 하였다. 마지막으로 정책측면의 경우는 사용후핵연료를 어느 시점에서 처분을 하느냐 즉, 후행핵연료주기의 운용을 어떻게 가져갈 것인가가 또한 경제성에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 그리하여 여기에서는 사용후핵연료의 처분은 중간저장 이후 10년 후에 발생하는 것을 기준으로 하였는데 이는 우리나라의 경우 1990년대 말에 사용후핵연료 중간저장 시설이 건설예정인 바 이 시설에 저장하는 것을 전제로 하였다.

먼저 우라늄 연료의 가격을 기준가격인 54.3 \$/kgU에서 $\pm 25\%$ 까지 5%의 간격으로 변화시킬 때의 결과를 살펴 보면, 기준가격 보다 우라늄 연료의 가격이 상승 또는 하락할 경우에 우라늄 연료주기와 MOX 연료주기의 결과가 큰 폭으로 변화하지는 않지만 결과 자체는 민감함을 알 수 있다. 이는 기준안 자체의 두 주기의 경제성이 상당히 근사한 결과를 나타냈기 때문에 약간의 가격 변화에도 그 경제성의 우위는 변화하게 된 것이다. 기준가격 보다 우라늄 가격이 하락할 경우에는 우라늄 연료주기의 경제성이 우월한 것으로 나타났으며, 5%만 가격이 상승하여도 MOX 연료주기의 경제성이 우월한 것으로 분석되었다. 이에 대한 결과는 그림-2와 같다.

사용후핵연료의 최종처분 시기에 대한 민감도분석은 5년간의 사용후핵연료를 중간저장 한 후에 얼마기간 후에 처분을 하느냐에 대한 것이다. 여기에서는 중간저장 후에 바로 처분하는 것에서부터 30년 후에 처분하는 것까지에 대해 살펴보았다. 그림-3에 나타난 민감도분석의 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 사용후핵연료의 처분이 중간저장 후에 가까운 시일 내에 이루어 질수록 MOX 연료주기의 경제성이 우월하며, 나중에 처분하면 할 수록 우라늄 연료주기의 경제성이 우월한 것으로 분석되었다. 결국 여기에서의 결과는 사용후핵연료의 처분과 관련된 정책을 적극적으로 가져 가느냐 소극적으로 가져 가느냐에 따른 결과의 변화라고도 말할 수 있기 때문에 정책 입안자의 입장에서 중요한 판단의 기준이 될 수 있을 것이다.

마지막으로 사용후핵연료를 처분할 것인지 아니면 재처리를 할 것인지를 결정하는 문제는 결국 두 비용의 변화에 의하여 영향을 받기 때문에 이에 대한 분석을 수행하였다. 민감도분석은 기준이 되는 처분비용/재처리비용인 670/770 \$/kgHM에서 ± 200 \$/kgHM까지의 구간 내에서 두 비용이 동시에 변화가 일어날 때의 영향을 살펴보았으며 그 결과는 그림-4와 같다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 두 비용의 변화가 기준가격 이하일 경우에는 MOX 연료주기가 경제성이 우월하지만 기준가격 이상일 경우는 우라늄 연료주기가 경제성이 우월한 것으로 분석되었다.

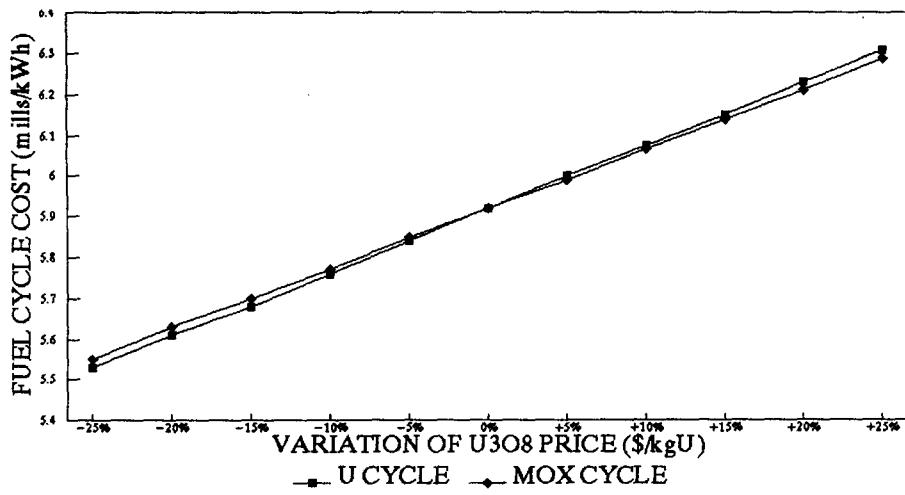


그림-2 우라늄 가격의 민감도분석

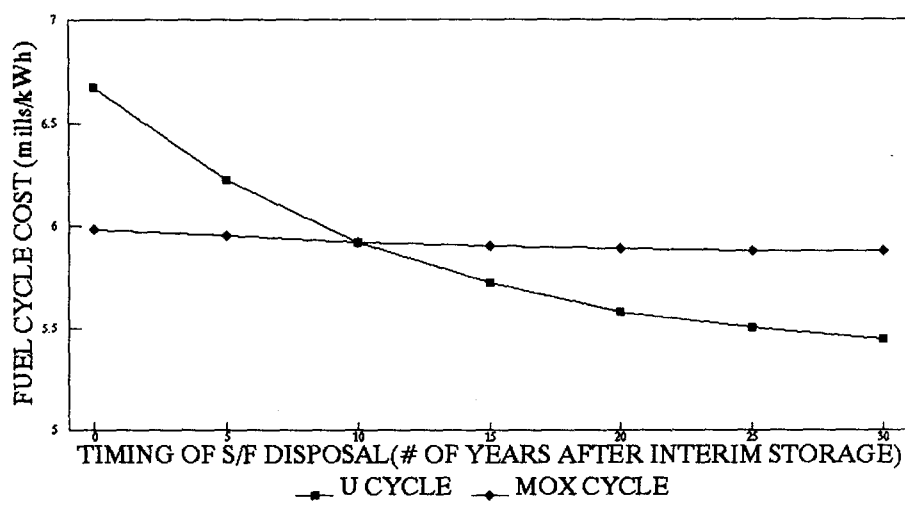


그림-3 사용후핵연료 처분시기의 민감도분석

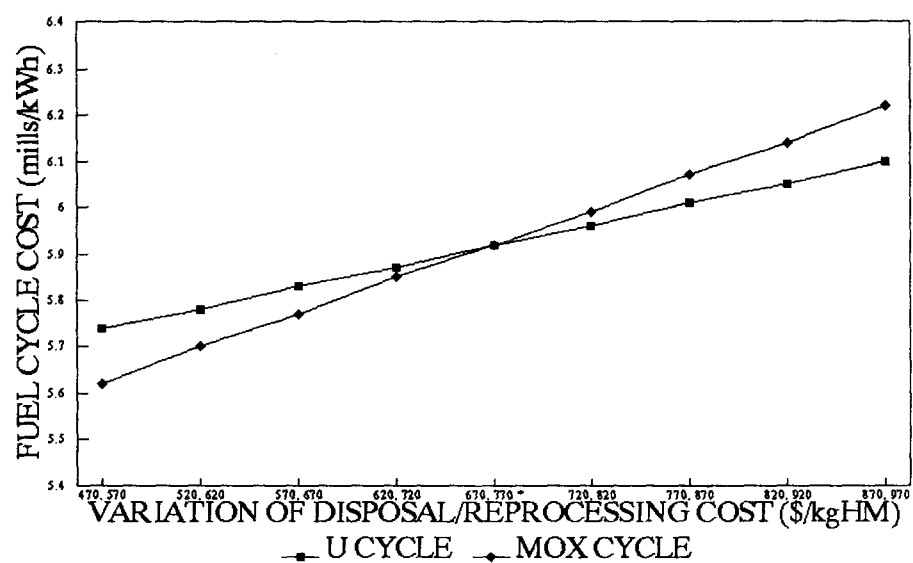


그림-4 사용후핵연료 처분비용/재처리비용의 민감도분석

5. 결 론

본 연구의 결과에 의하면 MOX 연료주기와 우라늄 연료주기의 핵연료주기비는 거의 차이가 나지 않는 것으로 분석되었다. 또한 우라늄 가격, 사용후핵연료 처분시기, 사용후핵연료 처분비용 및 재처리비용 등의 변수를 대상으로 민감도분석을 수행한 결과 MOX 연료를 이용하는 것이 상당한 경쟁력을 갖고 있는 것으로 평가되었다. 이상의 결과를 통해 얻을 수 있는 결론은 다음의 몇가지로 요약할 수 있다.

첫째, MOX 연료 개발의 당위성이 경제성 측면에서 제시되었기 때문에 이를 구체적으로 개발·이용하기 위한 연구가 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

둘째, MOX 연료의 이용은 경제적 타당성 이외에 사용후연료의 재이용에 따른 폐기물 감소 효과가 있으며, 에너지의 해외의존도를 개선시킬 수 있다.

셋째, 국내의 MOX 연료와 관련된 기술자료가 확립되어 이를 국내의 노형에 장전하는 경우를 분석한다면 좀 더 의미있는 결과가 산출될 것이다.

넷째, 국내의 핵연료주기 및 노형전략과 연계하여 MOX 연료 도입의 타당성을 분석하는 것 또한 중요한 연구분야가 될 것이다.

참고문헌

1. A. Vielvoye and H. Bairiot, Economic Optimization of MOX Fuel, Nuclear Europe Worldscan, 1991.
2. E. R. Johnson, Nuclear Fuel Cycle Economics, Nuclear Materials Management, 1983.
3. Karen Barker, Investing in MOX for the Future, Nuclear Engineering International, 1990.
4. OECD, Nuclear Energy and its Fuel Cycle, 1987.
5. OECD/NEA, Nuclear Power Economics and Technology: An Overview, 1992.
6. OECD/NEA, Plutonium Fuel An Assessment, 1989.
7. OECD/NEA, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, 1985.
8. OECD/NEA, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, 1993.
9. P. M. S. Jones, Assessing the Merits of MOX, Nuclear Engineering International, 1989.
10. P. M. S. Jones, The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Energy, No. 28, 1989.
11. Robert L. Civiak, Plutonium Economics and Japan's Nuclear Fuel Cycle Policies, 1998. 3.
12. Warren F. Witzig, The Economics of Plutonium-Uranium Recycling to the Nuclear Program in the Country of Spain, Nuclear Technology Vol. 58, 1982. 7.
13. 한국전력공사, 원별 경제성 비교분석, 1993. 7.