

UCO 핵연료의 가압경수로 적용에 대한 경제성 평가

류 석진, 김 명현

경희대학교

요 약

탄소피막된 UCO 핵연료를 가압경수로의 핵연료로서 적용하는 방안에 대해 경제성 평가를 하였다. 성형가공비용이 367\$/kgU이고, 성형가공 선행기간이 8개월이라고 가정하여 계산한 결과, 할인율 5%의 경우 UCO 핵연료는 UO_2 핵연료에 비해 0.04mills/kwhre만큼 유리하였고, 할인율 10%의 경우 0.11mills/kwhre만큼 경제성면에서 유리하게 나왔다. 그러나 성형가공비용이 550\$/kgU, 성형가공 선행기간이 12개월일 때는 할인율 5%, 10%경우 각각 0.41mills/kwhre, 0.47mills/kwhre만큼 경제성측면에서 불리하게 나왔다. 따라서 UCO 핵연료의 가압경수로 적용은 UO_2 핵연료와 비교할 때 할인율 5%의 경우 성형가공의 비용 및 선행기간의 1.37배까지, 할인율 10%의 경우 1.45배까지는 경제성을 갖는다고 할 수 있다.

1. 서론

핵연료주기 측면에서 우라늄 자원의 효율성을 높이고 방사성폐기물 발생량을 감소시키며 노심의 안전성을 높이고 또한 핵주기 및 발전단가의 경제성을 높이기 위한 일환으로 미래형 원자로 및 신형 원자로에 이르기까지 연구, 개발되고 있다. 이와 관련하여 김명현과 이승기⁽¹⁾, 배장목⁽²⁾은 Graphite Matrix에 2중 탄소피막된 UCO 핵연료 입자들을 가압경수로의 펠렛안에 HCP로 packing시켜 PWR 소결체 모양으로 만든 새로운 핵연료를 연구하였다. 이런 핵연료는 탄소피막의 사용으로 방사능 누출을 차단하는 효과와 핵연료의 기계적 건전성을 증진시켜 고연소도에 유리하다. 또한 탄소 매트릭스의 사용으로 인한 열적 여유도가 증가하는 장점이 있다. 이런 배경으로 탄소피막 핵연료를 가압경수로 핵연료에 구성하는 핵연료 개념이 도입되었고 핵적 타당성이 있음을 보였다. 하지만 핵적 타당성이 있음을 보인 설계안에 대해서 경제성 평가는 거의 미미한 실정이다. 본 연

구에서는 UCO핵연료를 가압경수로에 적용할 경우 경제성측면에서 타당성이 있는지의 여부를 가압경수로(울진3/4호기) UO_2 핵연료와 비교하여 평가해 보았다. 특히 아직 설계단계에 있고 상용화 되어 있지 않는 UCO 핵연료의 경우 성형가공 비용 및 선행기간의 정확한 자료가 없는 까닭으로 성형가공의 비용과 선행기간에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 그리고 기존 가압경수로의 UO_2 핵연료와 비교하여 성형가공 비용 및 성형가공의 변화값이 핵연료주기비에 얼마정도 경제적으로 유리 또는 불리하게 작용하는가의 제한치를 구해 올바른 경제성을 평가하고자 한다.

2. UCO 핵연료를 사용하는 가압경수로 설계안

UCO 핵연료 소결체의 크기는 울진3/4호기 핵연료 소결체와 같으며 기본 설계는 원주형태의 소결체에 구 형태의 탄소 피막 입자를 채워 넣고 핵연료 입자간이나 핵연료 입자와 소결체 사이에 생기는 빈 공간에 Graphite를 채워 넣는 개념이다. UCO 탄소피막입자 핵연료를 사용하는 노심구성은 기본적으로 우리나라의 표준형 원자로로 구분되는 울진3/4호기를 모델로 하였다. 그리고 동일한 출력을 내고 핵연료 농축도가 5w/o 이내로 설계하였으며 가돌리니아 독봉의 사용은 농축도가 4w/o에서 9w/o로 독봉의 개수가 최고 12개까지 증가하였다. 이것은 탄소피막입자 핵연료를 가압경수로 펠렛에 채울 경우 우라늄의 장전량이 크게 줄어들게 된다. 때문에 줄어든 장전량을 보상해 주기 위해 농축도가 증가하였고 주기초의 높은 잉여반응도를 제어하기 위하여 가돌리니아 독봉의 농축도와 개수도 늘어나게 되었다. 핵연료봉의 axial zoning은 하지 않았으므로 핵연료 집합체는 9가지에서 7가지로 줄어들어 울진3/4호기의 핵연료형태보다는 간소화된 집합체로 노심구성을 하였다. 노심장전 모형은 울진3/4호기를 모델로 사용하였다.

3. UO_2 및 UCO의 핵연료주기비용 산출 및 비교

3.1 계산을 위한 모델 및 가정

핵연료주기 경제성을 평가하기 위한 프로그램은 핵연료주기 평가모형인 NUF₂CAP⁽³⁾이다. 본 연구에서 경제성 평가로 선택한 핵연료 모델은 가압경수로 UO_2 핵연료와 MHTGR에서 사용하는 탄소피막입자를 변형한 가압경수로용 UCO 핵연료이다. 여기에서 가압경수로의 핵연료주기 단가 및 핵연료주기 자료인 폐기농축도, 선행기간, 손실률등은 프랑스 N4형⁽⁴⁾을 채택했고 할인율은 국제적 추세인 5%와 한국개발연구원이 제시한 10%⁽⁵⁾를 선택했다. UO_2 와 UCO의 각 부문에서의 비용은 우라늄 구입비는 19.2\$/lb U_3O_8 , 변환비는 8\$/kgU, 농축비는 110\$/SWU, 성형가공비는 275\$/kgU이며 각각의 선행기간은 24개월, 18개월, 12개월, 6개월로 두 핵연료 모두 동일한 값을 가진다. UO_2 및 UCO의 농축도는 각각 3.34w/o, 4.95w/o이고 폐기농축도(Tail assay)는 모두 0.25w/o이다. 각 부문 escalation(%/yr)은 변동이 없으며 변환손실율은 0.5%, 가공손실율은 1.0%라고 가정했다.

UO₂와 UCO의 이용율은 80%이고, Specific power는 각각 37.334 MWt/MTU, 77.85 MWt/MTU이며, 출력 (2815 MWt)이 같다는 조건하에서 배출연소도는 각각 43,200 MWD/MTU 와 67,520 MWD/MTU이다.

3.2 계산방법

핵연료주기는 선행, 노심내, 후행등 세 부문으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 우라늄원광의 채광으로부터 가공된 핵연료가 원자로에 인도되기까지의 선행핵연료주기만 고려하여 핵연료주기비용을 산출하였다. 기존 UO₂ 핵연료와 비교할 때 농축공정까지 거의 같은 UCO 핵연료의 각 부문에서 우라늄 원광, 변환, 농축의 비용 및 선행기간은 이미 알고 있지만 성형가공면에서는 비용 및 선행기간에 대해 확실한 값들이 나와 있지 않다. 따라서 UCO 핵연료의 주요인자인 성형가공에 대해서 성형가공비용은 275\$/kgU에서 \$50씩 올려 가면서 550\$/kgU까지, 성형가공의 선행기간도 마찬가지로 6개월에서 12개월까지 1개월씩 올려 가면서 핵연료주기비용의 변동을 살펴 보았다.

3.3 UO₂와 UCO의 각 부문 비용 및 선행기간이 같을때의 핵연료주기비용

올진 3/4호기의 UO₂ 핵연료와 가압경수로용 UCO 핵연료의 각 부문 비용 및 선행기간이 같을때의 핵연료주기비용은 표 1에서 보는 바와 같이 가압경수로용 UCO 핵연료는 기존 가압경수로 UO₂ 핵연료보다 할인율 5% 적용시 0.26mills/kwhre만큼 경제적으로 유리하게 작용하고 할인율 10% 적용시 0.39mills/kwhre만큼 더 유리하다고 할 수 있다.

3.4 UCO의 성형가공의 비용과 선행기간 변동에 따른 핵연료주기비용

실제로 가압경수로용 UCO 핵연료의 농축과 성형가공의 비용 및 선행기간은 올진 3/4호기 UO₂ 핵연료보다 더 소모되기 때문에 올바른 경제성 평가를 위해서는 성형가공의 비용 및 선행기간을 고려해야만 한다. 본 연구에서 실시한 성형가공의 비용과 선행기간 변동에 따른 핵연료주기비용을 살펴 보면 다음과 같다. 첫째, 그림 1(그림 2)은 할인율 5%(10%)에 대해 UCO 핵연료의 성형가공 선행기간이 8개월일 때 UCO 핵연료의 성형가공비용의 변동에 따른 핵연료주기비용의 변동을 나타내는 것이다. 성형가공비용이 275\$/kgU일 때 핵연료주기비는 3.72mills/kwhre(4.25mills/kwhre)이고 성형가공비용이 325\$/kgU일 때 핵연료주기비는 3.82mills/kwhre(4.36mills/kwhre)이며 성형가공비용이 375\$/kgU일 때 핵연료주기비는 3.93mills/kwhre(4.48mills/kwhre)이다. 하지만 성형가공비용이 425\$/kgU이상일 때는 할인율 5%와 할인율 10%에 상관없이 모두 경제성면에서 불리하다. 둘째, 그림 3은 할인율 5%와 10%에 대해 UO₂ 핵연료주기비용과 같게 되는 UCO 핵연료 성형가공의 비용 및 선행기간의 제한치를 나타낸 그래프이다. 각각의 그래프는 3.95mills/kwhre,

4.57mills/kwhre의 발전단가를 나타내며 기존 가압경수로 UO_2 핵연료와 경쟁력이 되는 값들이다. 그리고 각 그래프의 위쪽 방향은 경제성측면에서 불리하며 그래프의 아래쪽 방향은 경제성측면에서 유리하게 작용한다고 볼 수 있다. 셋째, 그림 4와 그림 5는 현재까지 정확한 값을 갖고 있지 않은 가압경수로용 UCO 핵연료의 성형가공측면에서 할인율 5%와 10%에 대해 성형가공비용과 성형가공의 선행기간에 대한 두가지의 인자만으로 민감도를 나타낸 것이다. 기준치의 변화값에 의한 핵연료주기비를 나타내 본 결과 성형가공 선행기간의 변동에 따른 핵연료주기비에 미치는 영향은 거의 무시될 만큼 작으며 성형가공 비용의 변화값이 핵연료주기비를 결정하는 주요 인자라고 말할 수 있다. 마지막으로 각 부문의 선행 핵연료주기비에 대한 할인율의 영향을 표 1에 나타내었다. 그리고 그림 5에서 알 수 있듯이 성형가공의 선행기간은 핵연료주기비에 미치는 영향이 작으므로 성형가공주기에서 제외하고 성형가공비용만을 할인율 5%와 10%에 대해 그림 6에 도시하였다.

4. 결론

UCO 핵연료에 있어서 성형가공 비용과 선행기간에 대해 정확한 값을 모르고 있기 때문에 본 연구에서의 성형가공비용 367\$/kgU(기준비용의 1.33배), 성형가공 선행기간 8개월(기준기간의 1.33배)로 가상하고 경제성 평가를 실시하였다. 그 결과 할인율 5%의 경우 UCO 핵연료가 UO_2 핵연료보다 0.04mills/kwhre만큼 유리했고, 할인율 10%의 경우 0.11mills/kwhre만큼 경제성측면에서 유리하게 나왔다. 그러나 성형가공비용을 550\$/kgU(기준비용의 2배), 성형가공 선행기간 12개월(기준기간의 2배)로 설정했을 때는 할인율 5%, 10%경우 UCO 핵연료가 UO_2 핵연료보다 각각 0.41mills/kwhre, 0.47mills/kwhre만큼 경제성측면에서 불리하였다. 따라서 UCO 핵연료의 가압경수로 적용은 UO_2 핵연료와 비교할 때 할인율 5%의 경우 성형가공의 비용 및 선행기간의 1.37배까지, 할인율 10%의 경우 1.45배까지는 경제성을 갖는다고 할 수 있다.

참고문헌

1. M.H.Kim, S.G.Lee, Y.J.Kim, "Nuclear Feasibility of Carbon-coated Particle Fuels in PWR", *Trans.Am.Nucl.Soc.* 75, 362, (1996)
2. 배강목, "탄소피막 핵연료 입자를 충전한 신행 가압경수로 핵연료의 핵설계", 경희대학교 석사학위논문, (1997)
3. 송기동 의 "국내 핵연료주기 경제성 평가", KAERI/RR-1687/96, (1996)
4. OECD/NEA, "The Economics of the Nuclear Fuel Cycle", KAERI/TS-11/96, (1996)
5. 이영건 의 "원자력 경제성 분석 연구", KAERI/RR-759/88, (1988)

표 1. 핵연료주기비에 대한 할인율의 영향 (단위 : mills/kwhre)

연료형태 핵주기 부문	UO ₂		UCO	
	할인율 5%	할인율 10%	할인율 5%	할인율 10%
우라늄	1.19	1.43	1.13	1.33
변환	0.19	0.22	0.18	0.20
농축	1.67	1.91	1.81	2.03
성형가공	-	-	-	-
\$275/kgU	0.90	1.01	0.57	0.62
\$550/kgU	-	-	1.13	1.24
선행 부문 소계	3.95	4.57	(3.69 / 4.26)	(4.18 / 4.80)

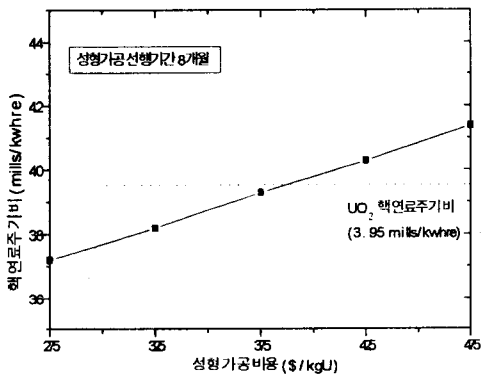


그림 1. 성형가공 비용의 변동에 따른 핵연료주기비 (할인율 5%)

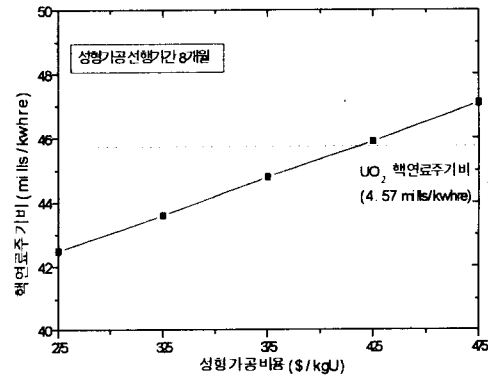


그림 2. 성형가공 비용의 변동에 따른 핵연료주기비 (할인율 10%)

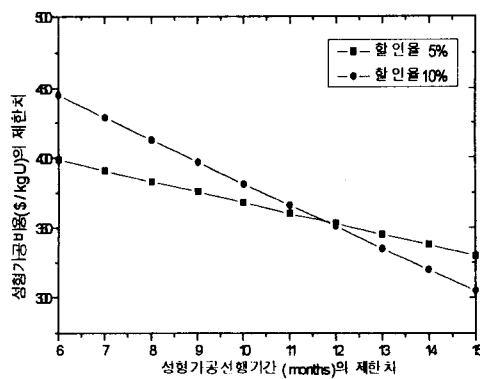


그림 3. 성형가공의 비용 및 선행기간의 변동에 따른 핵연료주기비의 제한치

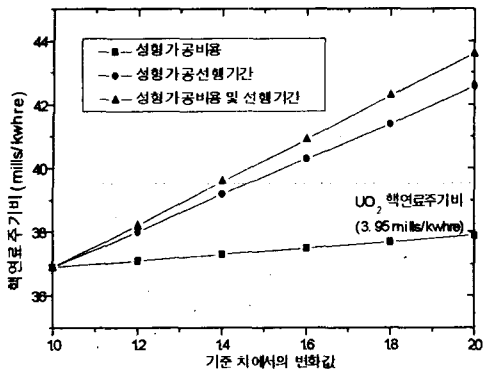


그림 4. 성형가공의 비용 및 선행기간의 변동에 따른 핵연료주기비 (할인율 5%)

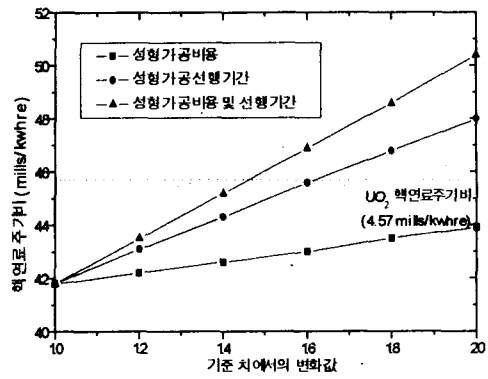


그림 5. 성형가공 비용 및 선행기간의 변동에 따른 핵연료주기비 (할인율 10%)

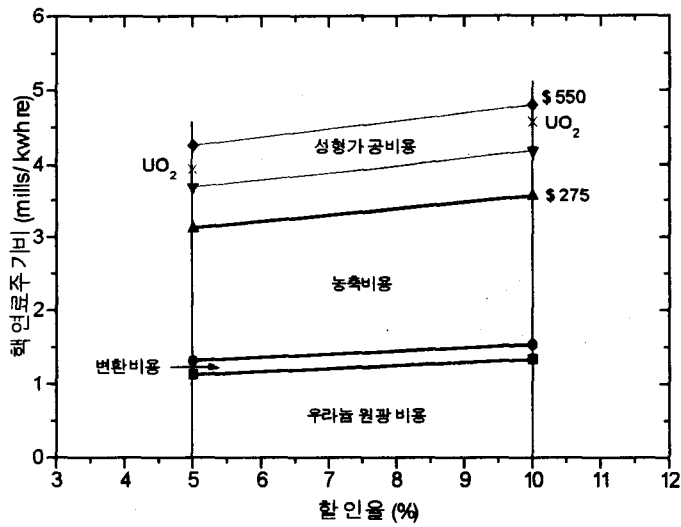


그림 6. UCO 핵연료주기비에 대한 할인율의 영향