

칼리머 착탈식과 회전플러그식의 경제성 분석

문기환, 석수동, 김인철
한국원자력연구소

Economic Comparison of Plug-in/Plug-out IVTM and Rotatable Plug IVTM

Kee-hwan Moon, Soo-dong Suk, In-chul Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

1. 서론

우리나라는 현재 고유의 액체금속로 모델인 KALIMER(Korea Advanced LIquid Metal Reactor)의 개발을 통해 에너지 자원의 이용 효율 증대와 사용후 핵연료 및 초 장수명핵종 소멸처리 문제 등과 같은 에너지 안보와 환경 문제를 동시에 해결하려 하고 있다.

한편 KALIMER의 개발이 그 의미를 갖기 위해서는 고려중인 개념들이 기술적인 측면에서 기능성, 제작성, 안전성, 운용성, 독창성 등이 우수해야 할 뿐만 아니라 경제성이 확보되어야 한다. 그리하여 본 연구에서는 연료의 재장전을 위한 노용기내 핵연료 이송기(In-Vessel Transfer Machine, IVTM)와 관련하여 고려되고 있는 두가지 개념인 착탈식(Plug-in/Plug-out IVTM)과 회전플러그식(Rotatable Plug/IVTM)에 대해 비용 측면에서 분석함으로써 이 분야의 설계개념 정립을 위한 기초자료로 활용하도록 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 두 대안에 대한 자본비, 핵연료교체 기간 및 관련 비용, 부대 시설 건설비 등을 산출하였다. 또한 비용효과 관련 인자의 인과 관계를 파악하였다.

2. 비용요인의 인과관계

그림-1은 착탈식과 회전플러그식의 비용에 영향을 주는 요인의 인과 관계를 나타낸다. 인과 관계는 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 노의 구조, 핵연료 재장전 설비, 핵연료 교체 작업 및 전체발전소 설계 부문으로 정량화가 가능한 부문을 중심으로 살펴보았다. 본 연구에서는 개괄적으로 이들을 반영하였지만 포괄적인 측면에서의 영향 요인은 설계의 완성도에 따라 추후에 반영할 필요가 있다.

착탈식

회전플리그식

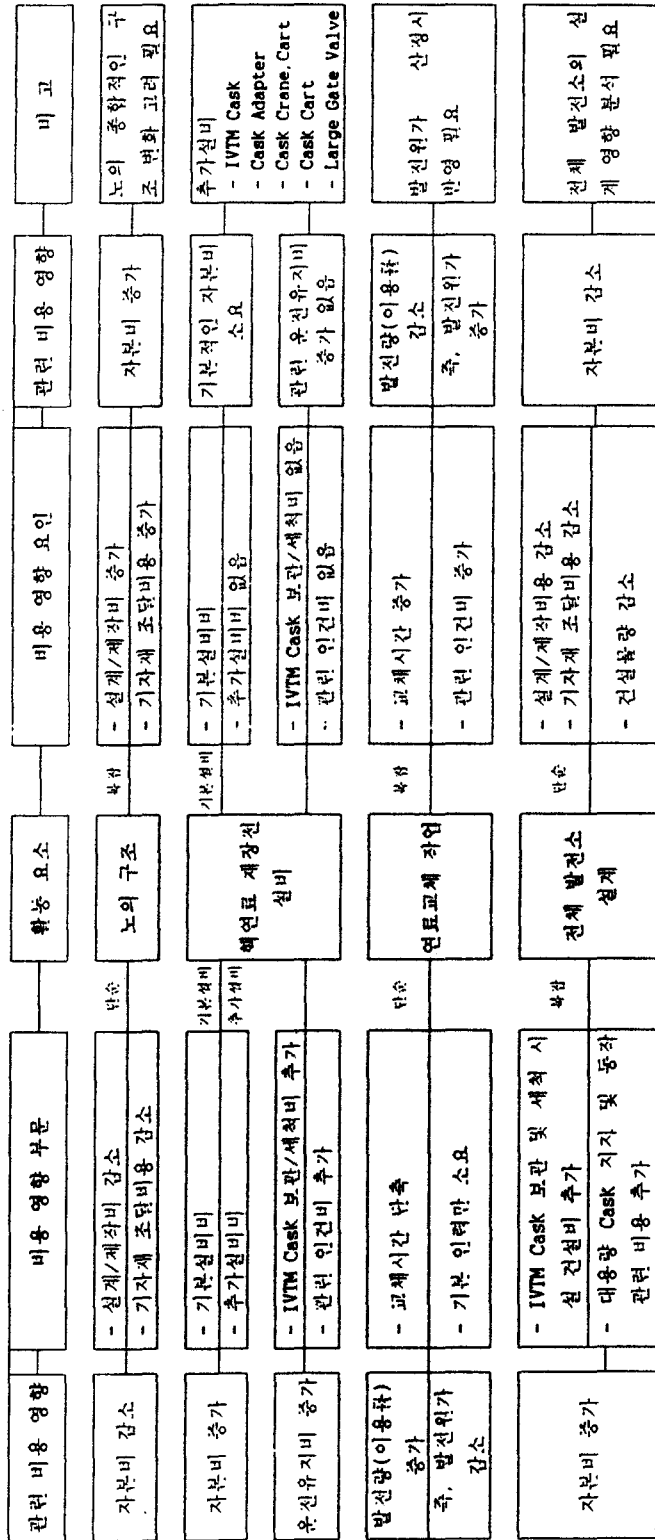


그림-1 착탈식과 회전플리그식의 비용 영향요인의 인과 관계

3. 대안별 분석

착탈식과 회전플러그식의 비용은 노심 상부 구조물 및 핵연료 교환 작업과 관련된 설비 비용으로 구성되며, 이를 표-2에 정리하였다. 비용 자료는 GE (General Electric)에서 물량과 단위비용 등을 이용하여 산정한 값을 인용하였다. 여기에서의 설비 비용은 1-Reactor Plant 경우 즉 발전소당 1기의 원자로 건설·운전시의 자료를 나타낸다. 또한 다양한 용량 즉 150MWe~1350MWe에 대한 평가를 통해 기존 상용규모에서 이들 두 대안의 역할 분석을 시도하였다.

표-2 대안별 설비비 자료 (1-Reactor Plant 기준)

항 목	설비비용 (백만\$)	
	착탈식	회전플러그식
Plug-in/Plug-out IVTM	4.5	-
IVTM/UIS plug Cask	5.0	-
IVTM Cask Adapter	0.7	-
Large Gate Valve	0.5	-
IVTM Cask Crane	3.0	-
IVTM Cask Cart	0.4	-
Rotatable Plug	-	4.0
IVTM for Rotatable Plug	-	2.0

주) Fuel Transfer Cask, Fuel Transfer Cask Cart, Fuel Transfer Cask Adapter는 착탈식과 회전플러그식에서 공통적으로 이용되는 설비이므로 여기에서는 제외시킴.

표-3은 1기, 3기, 6기, 9기의 원자로로 구성된 발전소들에 대한 착탈식과 회전플러그식의 필요한 설비 대수를 나타낸다.

표-3 대안별 주요 설비의 소요 대수

항 목	1-Reactor Plant		3-Reactor Plants		6-Reactor Plants		9-Reactor Plants	
	착탈식	회전 플러그식	착탈식	회전 플러그식	착탈식	회전 플러그식	착탈식	회전 플러그식
Plug-in/Plug-out IVTM	1	-	2	-	2	-	2	-
IVTM Cask	2	-	3	-	3	-	3	-
IVTM Cask Adapter	1	-	2	-	2	-	2	-
Large Gate Valve	3	-	4	-	4	-	4	-
IVTM Cask Crane	1	-	2	-	2	-	2	-
IVTM Cask Cart	2	-	3	-	3	-	3	-
Rotatable Plug	-	1	-	4	-	7	-	10
IVTM	-	1	-	4	-	7	-	10

이 표에서도 알 수 있는 바와 같이 1-Reactor Plant의 경우, 설비가 자주 이용되지 않을 뿐만 아니라 설비의 수선과 보수를 연료 재장전 기간 동안에 처리하는 것으로 가정하였기 때문에 기본설비 이외의 추가 설비가 필요 없는 것으로 하였다. 하지만 3, 6, 9 Reactor Plants 대안의 경우에는 설비의 이용빈도가 높고 연료 재장전 기간 동안에 설비의 수선과 보수를 할 수 없기 때문에 추가의 설비가 필요한 것으로 가정하였다.

표-2의 비용자료와 표-3의 소요 설비 대수를 이용하여 착탈식과 회전플러그식의 자본비를 산출한 결과는 표-4와 같다. 이 표의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 착탈식은 3-Reactor Plants (450MWe) 이상이 되어야 회전플러그식에 비해 자본비의 절감 효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

표-4 착탈식과 회전플러그식의 자본비(백만\$) 비교

대 안	착탈식	회전플러그식
1-Reactor Plant (150MWe)	20.5	6.0
3-Reactor Plants (450MWe)	34.6	24.0
6-Reactor Plants (900MWe)	34.6	42.0
9-Reactor Plants (1,350MWe)	34.6	60.0

착탈식은 회전플러그식에 비해 연료 재장전을 위한 복잡한 절차 때문에 준비시간이 3배 정도 더 소요되며, 운전을 위한 준비시간도 2배 정도 더 소요되는 것으로 나타났다. 그러나 착탈식은 원활하게 연료 재장전 작업을 수행할 수 있기 때문에 회전플러그식에 비해 다소 연료 재장전 시간을 절감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 연료 재장전 시간의 종합적인 비교는 표-5에서 보는 바와 같이 착탈식이 4.8일 더 소요되는 것으로 나타났다.

표-5 대안별 연료 재장전 기간(일) 비교

작업 내용	착탈식	회전플러그식
운전 정지	1.7	1.7
연료 재장전 준비	5.0	1.4
연료 재장전	6.1	7.6
운전 준비	5.3	2.6
운전 및 시험	1.0	1.0
계	19.1	14.3

표-6은 연료 재장전을 위한 발전소 구성 대안별 소요 인력을 나타내며, 표-7은 표-5의 연료 재장전 기간과 표-6의 자료를 이용하여 착탈식과 회전플러그식의 연료 재장전 관련 인건비를 산출한 결과이다. 표-7의 결과에 의하면, 연료 재장전 관련 인건비는 착탈식이 회전플러그식에 비해 28%~40% 정도 절감할 수 있을 것으로 분석되었다.

표-6 발전소 구성 대안별 연료재장전 관련 소요인력(인) 비교

대 안	전문기술인력	지원인력	계
1-Reactor Plant (150MWe)	2	4	6
3-Reactor Plants (450MWe)	5	12	17
6-Reactor Plants (900MWe)	10	24	34
9-Reactor Plants (1,350MWe)	15	36	51

주) 전문기술인력과 지원인력의 일인당 인건비(\$/일)는 각각 \$122, \$113 적용하였으며, 행정 관련 인력은 동일하다고 가정함.

표-7 착탈식과 회전플러그식의 연료재장전 관련 인건비(1,000\$) 비교

대 안	착탈식	회전플러그식
1-Reactor Plant (150MWe)	4.7	6.5
3-Reactor Plants (450MWe)	11.7	19.4
6-Reactor Plants (900MWe)	23.4	38.8
9-Reactor Plants (1,350MWe)	35.1	58.3

착탈식이 회전 플러그식에 비해 경제성 측면에서 단점으로 지적되고 있는 IVTM Cask의 저장과 세척을 위한 시설의 건설비를 추정하였으며, 그 결과는 표-8과 같다. 이 표에 나타난 바와 같이 1-Reactor Plant의 경우는 약 120만\$, 그리고 3, 6, 9 Reactor Plants일 경우는 약 190만\$ 정도가 회전플러그식에 비해 더 소요되는 것으로 분석되었다.

표-8 착탈식의 IVTM Cask 저장을 위한 건설비(1,000\$)

	기본 건설비	인건비	계	건물 크기(m)
1-Reactor Plant	547.8	6.35	1,181.3	20.5x20.5x27.1
3,6,9 Reactor Plants	893.6	1,033.6	1,927.2	29.8x29.8x27.1

주) 기본건설비는 concrete, rebar, formwork, structural steel, embeded material, metal deck, miscellaneous steel 비용으로 구성됨.

앞에서 분석한 착탈식과 회전플러그식의 자본비, 연료재장전 관련 인건비, IVTM Cask 저장시설 건설비 등을 종합적으로 고려한 결과를 표-9에 정리하였다. 이 표에서 나타난 바와 같이 다수의 Reactor로 발전소를 구성할수록 착탈식이 비용 측면에서 유리함을 알 수 있다. 즉, 3-Reactor Plants일 경우는 착탈식이 회전플러그식에 비해 1.52배의 비용이 소요되지만, 9-Reactor Plants일 경우는 오히려 0.61로 절감효과가 큰 것으로 나타났다.

표-9 착탈식과 회전플러그식의 비용(1,000\$) 종합 비교

비용 구분		1-Reactor Plant	3-Reactor Plants	6-Reactor Plants	9-Reactor Plants
착탈식	자본비	20,500	34,600	34,600	34,600
	연료재장전 관련 인건비	5	12	23	35
	IVTM Cask 저장시설 건설비	1,181	1,972	1,972	1,972
	비용 계	21,686	36,584	36,595	36,607
회전 플러그식	자본비	6,000	24,000	42,000	60,000
	연료재장전 관련 비용	7	19	39	58
	비용 계	6,007	24,019	42,039	60,058
비용의 상대비율 (착탈식/회전플러그식)		3.61	1.52	0.87	0.61

4. 결 론

착탈식과 회전플러그식의 자본비, 연료재장전 관련 인건비, IVTM Cask 저장시설 건설비 등에 소요되는 비용을 기준으로 할 때, 3개의 Reactors(450MWe) 이하로 플랜트를 구성할 경우는 회전플러그식이 경제성 측면에서 유리하지만 그 이상의 경우는 착탈식이 유리한 것으로 나타났다. 하지만 이와 같은 비용 비교는 전체 플랜트 설계 관점에서의 비용 증감에 대한 평가가 추가로 이루어질 필요성이 있다.

참고문헌

1. GE Nuclear Energy, "KALIMER Plug-in/Pulg-out IVTM Design Study", June 1997.
2. 한국원자력연구소, "Design Study for KALIMER Upper Internal Structure and Reactor Refueling System", KAERI/TR-758/96, Sep. 1996
3. 한국원자력연구소, "KALIMER의 경제적 타당성 분석", KAERI-TR-808/97, Jan. 1997.