

하나로 주기길이 연장과 핵연료 재장전 방식 변경에 대한 연구

A Study on the Extension of the Cycle Length and Change of the Fuel Reloading Pattern for HANARO

이충성 · 조동건 · 박상준 · 김현일

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로는 한 주기가 30MW로 28일을 운전하는 것으로 설계되었으며 연간 9주기 정도를 운전한다. 한 주기에 36봉 핵연료 집합체 3다발과 18봉 핵연료 집합체 2다발이 소모되며 연간 9주기를 운전한다고 하였을 때 36봉 핵연료 집합체가 27 다발, 18봉 핵연료 집합체가 18다발이 소모된다. 본 논문에서는 연간 사용되는 핵연료 집합체 수를 줄일 수 있는 방안으로 주기길이 연장과 핵연료 교체 방법의 변경에 대하여 검토하였다. 주기길이 연장에 대한 검토로 한 주기를 29.5일과 30일로 하였을 때 주기말 초과 반응도와 최대선출력을 분석하였다. 분석결과 29.5일과 30일의 주기 길이에 대하여 주기말 초과반응도는 각각 14.4mk, 11.0mk로 평가되었으며 최대선출력은 현재보다 약간 증가하였다. 주기길이를 30일로 연장하는 것은 주기말 초과반응도가 작아 조사시험을 고려하였을 때 조금 어려운 것으로 나타났다. 그러나 29.5일로 한 주기를 하면 주기말 초과반응도가 약간 커지고 연간 36봉 핵연료 집합체 2다발 정도가 절약되는 것으로 나타났다. 한 주기 길이를 현재와 같이 28일로 그대로 두고 핵연료 재장전 방법을 바꾸었을 때는 주기말 초과반응도가 14mk ~ 23mk 이며 7주기동안에 18봉 핵연료 집합체 2다발을 절약할 수 있었다. 이 두 방법 모두 지금보다 초과반응도가 줄기 때문에 조사시험에 대한 관리가 필요하다.

Abstract

HANARO is operated with the cycle length of 28 days at 30MW and thus about 9

cycles a year. Three 36-element assemblies and two 18-element assemblies are discharged in the core and refueled. About 27 36-element assemblies and 18 18-element assemblies are consumed during a year. To reduce the consumption of fuel assemblies, the methods extending the cycle length and changing the fuel reloading pattern were studied in this paper. These two methods make the maximum linear power higher than current value. The excess reactivity at the end of cycle for the cycle length of 29.5 and 30 days is reduced to 14.4mk and 11.0mk. By the extension of the cycle length, more than two 36-element fuel assemblies are saved during a year. When the fuel reloading pattern is changed, the excess reactivity at the end of cycle has the value from 14mk to 23mk and two 18-element assemblies are saved during a year. But it is needed to manage the irradiation tests in the core because of decreasing the excess reactivity.

1. 개요

하나로는 현재 한 주기를 출력 30MW로 28일 운전하는 것으로 노심 관리를 수행하고 있으며 그 기준은 다음과 같다[1].

- 한 주기 길이는 최소한 28일 이상일 것
- 최대 선출력은 제한치 이하일 것
- 원자로는 충분한 정지여유도를 가질 것
- 열중성자속은 가능한 높을 것
- 핵연료 방출연소도는 50%U-235 이상일 것

하나로는 그림 1과 같이 노심 영역과 반사체 영역으로 나누어져 있으며 노심영역은 내부 노심과 외부 노심으로 구분된다. 하나로 노심에는 현재 36봉 핵연료 집합체 20 다발과 18봉 핵연료 집합체 12 다발이 장전되어 있으며 핵연료 교체는 표 1과 같이 한 주기 운전 후에 36봉 핵연료 집합체 3다발과 18봉 핵연료 집합체 2다발을 노심에서 인출하고 새 핵연료 집합체를 장전한다. 매주기 노심에서 방출되는 5다발의 핵연료 집합체중 36봉 핵연료 집합체 2 다발은 7주기를, 나머지 36봉 집합체 1 다발과 18봉 집합체 2다발은 6주기 동안 노심에 머물게 되며 방출 연소도는 36봉 핵연료 집합체가 54 ~ 56%U-235이고 18봉 핵연료 집합체가 약 51%U-235이다.

현재 핵연료 방출 연소도는 그 동안의 운전 경험과 하나로 핵연료 조사시험 결과 지금보다 더 높일 수 있음을 확인하였다[2]. 이를 바탕으로 하나로에서 사용하는 핵연료의 양

을 절약하는 차원에서 28일로 되어있는 한 주기의 길이를 늘이는 방안과 핵연료 교체 방법의 변경에 대하여 검토하였다. 노심 분석은 WIMS, VENTURE로 구성된 하나로 노심 관리 전산체계를 사용하였다[3].

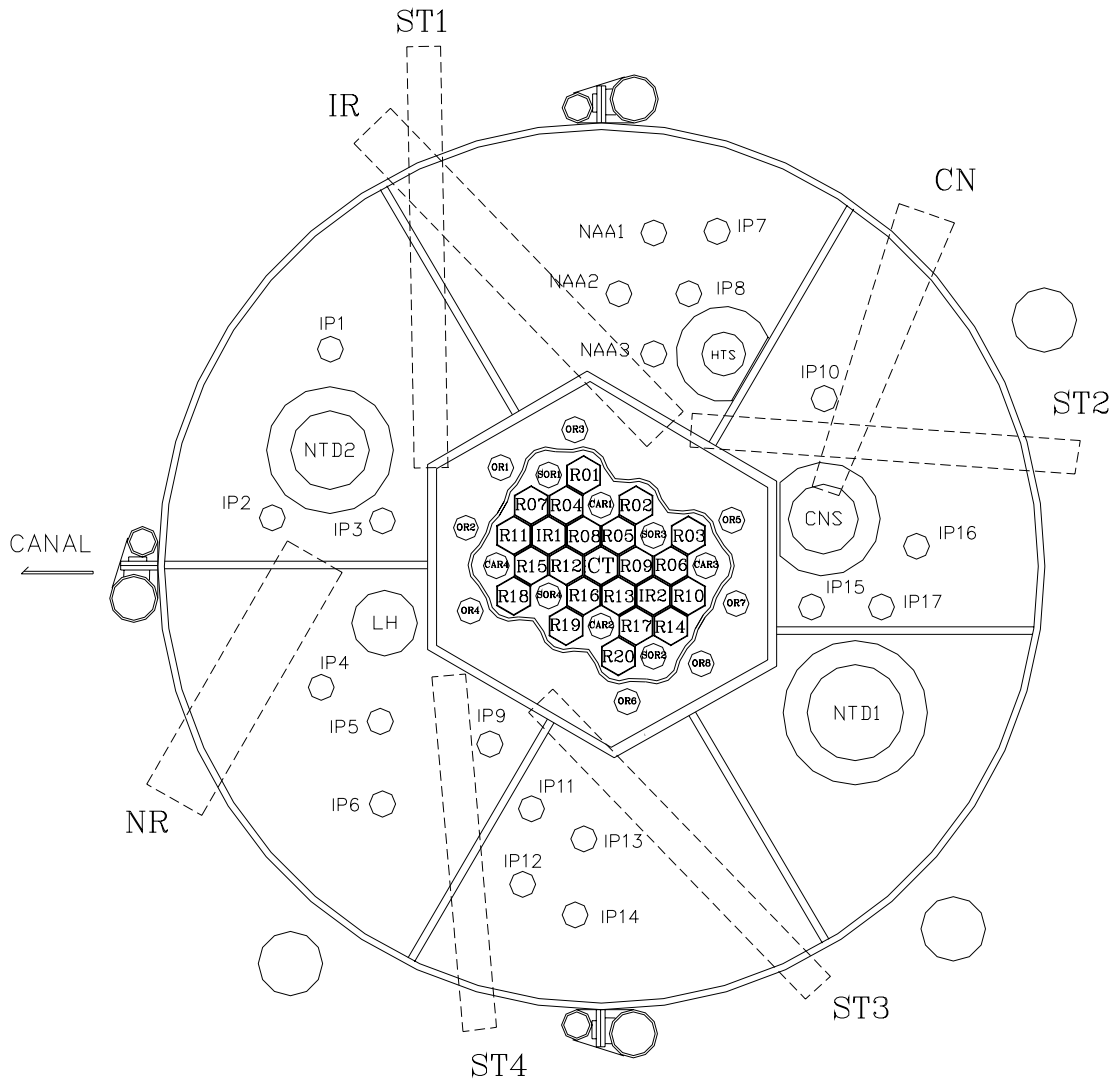


그림 1 하나로 노심

표 1. 하나로 핵연료 재장전 및 이동 경로

평형노심-A를 위한 핵연료 장전 및 이동
NEW FUEL → CAR4 → SOR2 → CAR2 → OR7 → OR8 → SOR4 → OUT
NEW FUEL → CAR3 → SOR1 → CAR1 → OR2 → OR1 → SOR3 → OUT
NEW FUEL → R07 → R15 → R04 → R11 → R01 → R18 → R08 → OUT
NEW FUEL → R14 → R06 → R17 → R10 → R20 → R03 → R13 → OUT
NEW FUEL → R05 → R12 → R19 → OUT
평형노심-B를 위한 핵연료 장전 및 이동
NEW FUEL → CAR4 → SOR2 → CAR2 → OR7 → OR8 → SOR4 → OUT
NEW FUEL → CAR3 → SOR1 → CAR1 → OR2 → OR1 → SOR3 → OUT
NEW FUEL → R07 → R15 → R04 → R11 → R01 → R18 → R08 → OUT
NEW FUEL → R14 → R06 → R17 → R10 → R20 → R03 → R13 → OUT
NEW FUEL → R16 → R09 → R02 → OUT

2. 노심관리 변경 방안

가. 주기길이 연장

하나로는 주기말 초과반응도가 실험물 장전을 고려하여 25mk 이상의 여유가 있도록 설계되었다. 현재 노심관리 절차를 따라서 핵연료를 교체하면 주기말에 노심내 실험물이 없는 Xe 평형 상태에서 초과 반응도는 약 27.8mk이다. 그 동안 운전 경험에 비추어 실험물이 없을 때 27.8mk의 주기말 초과반응도는 약간 여유가 있는 상태로 주기길이를 늘일 수 있을 것으로 판단하였다. 주기길이를 늘이기 위해서 고려해야할 사항으로는 실험물이 장전되었을 때 주기말에 임계를 유지하는가와 주기길이 연장에 따라 핵연료 연소가 더 이루어지는 것에 대한 핵연료 건전성 문제, 그리고 최대 선출력이 제한치를 초과하는 지를 검토하여야 한다.

핵연료 연소도 증가에 대한 문제는 하나로 인허가 조건 사항으로 수행한 하나로 핵연료 연소 시험 및 조사후 시험 결과 핵연료 집합체 평균 연소도 52.8%, 69.7%, 63%U-235에서 핵연료 건전성이 유지됨을 확인하였다. 따라서 핵연료 집합체의 구조적 건전성만 유지된다면 현재의 방출연소도 이상으로 핵연료를 연소시킬 수 있다.

주기말에 임계를 유지하여야 하므로 우선 어느 정도까지 주기길이를 연장시킬 수 있는지를 분석하였다. 노심에 장전되는 실험물을 고려하지 않고 30MW로 28일 운전한 평형노심의 주기말 상태에서 원자로를 1일에서 18일까지 더 운전하였을 때 제어봉이 완전 인

출 상태에서 유효증배계수의 변화는 그림 2와 같다. 현재 28일인 한 주기 운전 일수를 1일 늘렸을 때 노심에 장전된 핵연료 집합체는 방출될 때까지 지금보다 6일에서 7일 더 연소되는 것이다. 따라서 그림 2에서 보는 바와 같이 주기길이를 늘려야 2-3일까지 밖에 연장할 수 없다.

주기 길이를 2일 늘려 30일로 운전하였을 때 주기말에 초과 반응도는 약 11mk이고 주기길이를 1.5일 늘려 29.5일을 운전하였을 때는 주기말에 초과반응도는 약 14.5mk로 평가되었다. 방출 핵연료 연소도는 표 2와 같으며 조사공에서의 중성자속은 약간 증가하는 것으로 나타났다. 한 주기를 30일과 29.5일로 운전할 때 최대 선출력은 표 3과 같으며 열적 여유도 평가 결과 안전한 것으로 확인되었다.

표 2 주기길이 연장시 방출 핵연료 연소도

	연소도(%U-235)	
	29.5일	30일
36봉 핵연료 집합체	57.5	58.2
18봉 핵연료 집합체	53.8	54.7

표 3 주기길이 연장시 최대선출력

	최대선출력(kW/m)			
	36봉 핵연료	18봉 핵연료		
		SOR	CAR	OR
현재	95.73	83.99	92.45	64.56
29.5일 운전시	97.14	84.24	93.90	63.34
30일 운전시	97.46	84.39	94.29	63.08

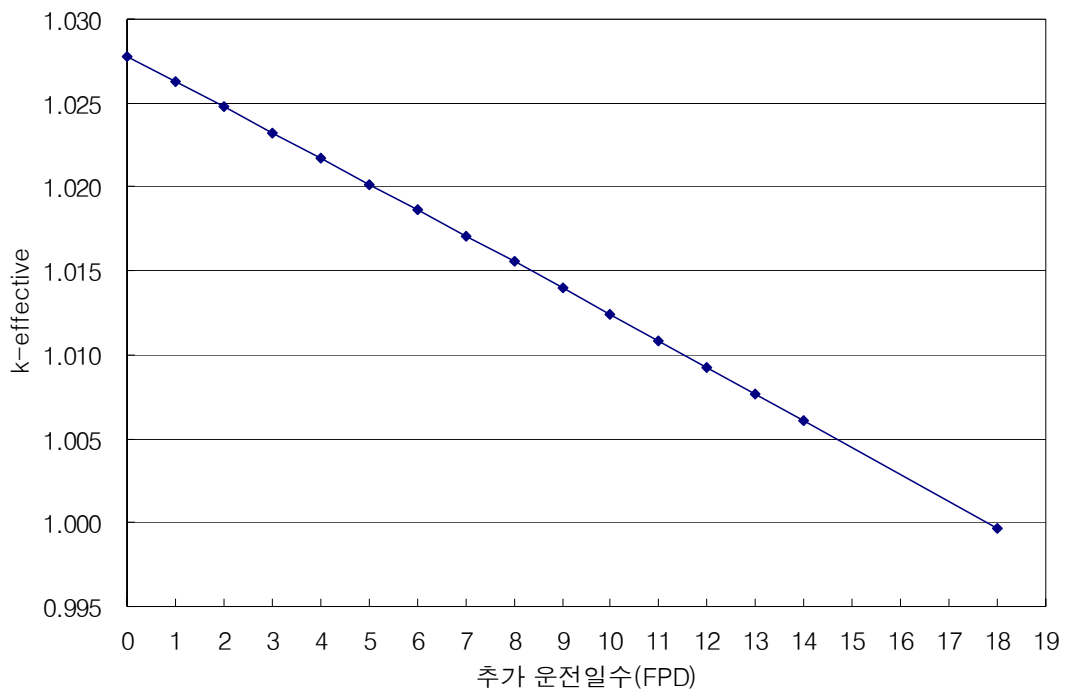


그림 2 현재 평형노심에서 추가운전시 노심 유효증배계수(제어봉 완전 인출)

나. 핵연료 교체 방법 변경

연간 소모되는 핵연료 집합체의 수를 조금이나마 줄이는 방법으로 주기길이를 늘이는 방법외에 핵연료 재장전 방법을 바꾸는 것을 고려하였다. 이 방법은 현재 사용하고 있는 표 1의 핵연료 재장전 방법에서 6주기 동안은 현행과 같이 매주기 5다발의 핵연료 핵연료를 교체 장전하고, 다만 7주기 재장전시 18봉 핵연료 집합체는 교체하지 않고 36봉 핵연료 집합체 3다발만 교체하는 방법이다. 즉 18봉 핵연료 집합체를 지금보다 한 주기 더 연소시키는 것이다. 이 방법에 대한 분석은 하나로 평형노심에서 36봉 핵연료 집합체 3다발만을 교체하고 28일을 연소시킨 후에 6주기동안을 현재와 같이 핵연료 집합체 5다발씩 교체하면서 주기말 초과반응도와 최대선출력을 평가하였다. 주기말 초과반응도는 그림 3과 같이 36봉 핵연료 집합체를 3다발만 교체한 후의 노심에서 약 14mk 정도로 가장 작다. 그러나 이후 노심 초과반응도는 현재와 같이 핵연료 집합체를 5다발씩 교체함에 따라 조금씩 증가하여 23.7mk 정도까지 증가한다.

7주기동안 36봉 핵연료 집합체는 방출연소도가 거의 일정하나 18봉 핵연료 집합체의 경우 방출연소도가 매주기 다르다. 36봉 핵연료 집합체의 방출연소도는 평균 55.4%U-235 이고 18봉 핵연료 집합체의 방출연소도는 평균 55.6 ~ 59.1%U-235의 분포를 보인다. 최대 선출력의 경우 그림 3과 같이 36봉 핵연료집합체의 경우 18봉 핵연료 집

합체를 교체하지 않은 노심에서 최대값을 나타내며 18봉 핵연료 집합체의 경우 18봉 핵연료 집합체를 교체하지 않은 주기의 운전이 끝나고 핵연료 집합체 5다발을 교체하였을 때 최대선출력이 발생한다. 이 방법으로 핵연료를 교체하고 노심관리를 할 경우 7주기 운전 동안에 2 다발의 18봉 핵연료 집합체를 절약할 수 있다.

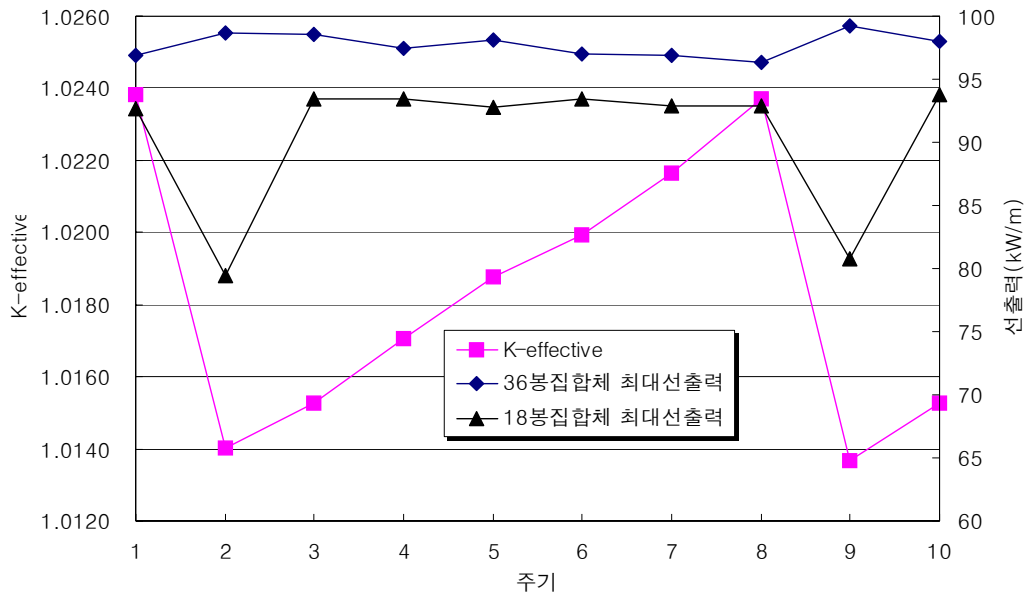


그림 3 핵연료 교체방법 변경시 주기말 초과반응도 및 최대선출력 변화

3. 실험물 장전시 운전 가능성 검토

하나로의 주기길이를 연장하여 운전하는 것은 주기말 초과반응도와 실험물에 의한 반응도값을 고려하여 결정될 것이다. 하나로에서 현재 이루어지고 있는 조사시험은 동위원소 생산, NTD 조사시험, 핵연료 조사시험, 재료 조사시험 등이 있다. 반사체 영역에서 이루어지는 조사시험은 노심 반응도에 큰 영향을 주지 않아 여기서는 고려하지 않았다. 주로 내부 노심의 CT, IR1, IR2 조사공과 외부 노심에 있는 4개의 OR 조사공에서 이루어지는 조사시험이 주로 노심 반응도에 영향을 준다. CT 및 2개의 IR 조사공에서는 이리듐 생산과 재료 조사시험을 위한 캡슐이 장전되고 OR 조사공에서는 핵연료 조사시험 캡슐과 동위원소 생산 rig가 장전된다. OR 조사공에서 이루어지는 핵연료 조사시험캡슐은 양의 반응도를 보이므로 본 분석에는 고려하지 않았다. 노심에 음의 반응도 효과를 주는 주요 조사시험에 대한 반응도는 표 4와 같다. 계장캡슐은 열중성자 흡수단면적이 큰

stainless steel로 이루어져 있어 매우 큰 음의 반응도를 나타낸다. 이리듐 rig의 경우 rig 안에 최대 4개의 캡슐이 장전되는데 표 4에 나타난 반응도값은 이리듐을 rig안에 최대로 장전하였을 때의 반응도값이다.

현재 이리듐 rig의 경우 계장캡슐을 장전하지 않을 때 CT, IR1, IR2 조사공에 모두 장전할 수 있다. 이리듐 rig에 최대한 장전할 수 있는 양을 넣고 CT, IR1, IR2에 장전하였을 때는 음의 반응도값이 약 13.4mk로 한 주기 운전 일 수를 30일로 할 경우 주기말에 초과반응도가 부족하게 된다. 한 주기를 29.5일로 하였을 때도 주기말에 반응도 여유가 거의 없기 때문에 운전에 주의하여야 할 것이다. 현재의 핵연료 재장전 방법을 바꾸는 방안도 주기말 초과반응도가 작은 노심에서는 계장캡슐의 조사시험에 주의를 기울여야 한다. 계장 캡슐이 CT에 장전되었을 경우 주기길이 30일 운전은 불가능하고 주기길이 29.5일의 운전도 이리듐 rig를 장전할 때 rig 안의 이리듐 장전량을 조절해야 할 것이다.

핵연료 재장전 방법을 바꾼 노심에서는 계장캡슐과 이리듐 rig 장전을 같이 할 수 있으나 그림 3의 초과반응도 변화에서 알 수 있듯이 초과반응도가 작은 노심에서는 주기말에 노심 초과반응도를 사전에 분석하여야 할 것이다.

표 4 노심 조사공 위치에서 반응도가 큰 실험물 반응도값

조사공	Ir Rig	계장캡슐
CT	4.8mk	11.4mk
IR	4.3mk	8.3mk
OR	1.6mk	

4. 결론

하나로 핵연료 소모량을 줄이기 위하여 한 주기의 길이를 29.5일과 30일로 늘이는 방안과 핵연료 교체 방법을 6주기동안 핵연료 집합체를 5다발씩 교체하다가 7번째 주기는 18봉 핵연료 집합체는 교체하지 않고 36봉 핵연료 집합체 3다발만을 교체하는 방법으로 바꾸는 방안에 대하여 검토하였다. 주기길이를 늘이는 방안으로는 연간 36봉 핵연료 집합체 2 다발 정도를 절약할 수 있으며 핵연료 재장전 방법을 바꿀 경우는 18봉 핵연료 집합체 2 다발 이상을 절약할 수 있다.

그러나 주기길이를 30일로 연장하였을 때는 계장캡슐 조사시험을 CT에서는 할 수 없고 계장캡슐 조사시험이 없을 때도 이리듐 rig에 장전되는 이리듐 장전량을 주기말 초과반응도를 고려하여 조절해야 한다. 한 주기를 29.5일로 연장했을 때는 30일로 연장했을 때보다 주기말 초과반응도에 여유가 있으나 계장캡슐 장전시 이리듐 장전량을 조절하여야 한다. 따라서 주기길이 연장시 계장캡슐을 장전할 때 주기말 초과반응도에 문제가 있

는데 계장캡슐은 1년에 한 두 번 장전하므로 계장캡슐을 장전할 때는 주기길이를 현재 28일로 하는 것도 하나의 방법일 수 있다. 핵연료 재장전 방법을 바꾸는 방법은 주기말 초과반응도에 문제가 없을 것으로 판단되나 계장캡슐 시험은 주기말 초과반응도가 작은 때를 피하여 조사시험 계획을 세워야한다.

또한 앞으로 노심 조사시험을 위하여 캡슐을 설계할 때는 가능한 시험 목적을 달성하고 노심에 반응도 영향을 적게 주도록 최적화시키는 방법을 고려하여야 할 것이다.

REFERENCE

- [1]. 김학노 외, "The in-core Fuel Management of the KMRR," KM-031-RT-K045, 한국원자력연구소 (1993).
- [2]. 손동성 외, "하나로 핵연료 조사시험(II) : 개정판," KAERI/TR-1970/2001, 한국원자력연구소 (2001).
- [3]. 이충성 외, "하나로 평형노심 특성분석," KAERI/TR-2320/2002, 한국원자력연구소 (2002).