

2004 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

고밀도 U-Mo 핵연료를 이용한  
하나로의 노심변환에 대한 노심특성 분석

Reactor Physics Analysis for HANARO Core Conversion  
Using High Density U-Mo Fuel

서철교(cgseo@kaeri.re.kr), 김창규, 김현일

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

현재 하나로 핵연료는 3.15 gU/cc의 U3Si/Al 핵연료를 사용하고 있다. 하나로의 이용을 증진시키기 위하여 고밀도 U-Mo 핵연료를 이용하여 하나로의 노심변환을 연구하였다. 최소변화를 갖는 노심변환을 위해 핵연료 외관은 그대로 유지하고 핵연료의 밀도만 변화시켰다. 하나로에서 조사된 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al과 다음 단계의 조사시험 후보인 5.0/4.3 gU/cc의 U7Mo/Al에 대하여 선출력, 중성자속, 반응도값 등의 주요 노심특성인자를 비교하였다.

U7Mo/Al 핵연료에 대하여 4개의 수직 조사공을 추가로 이용할 수 있는 새로운 노심모형을 적용하였다. 이 노심모형의 주기길이는 16% 및 27%가 늘어나지만 중성자속은 조금 낮아진다. 고밀도 노심의 구성으로 인한 선출력 증가는 핵연료 설계의 최적화로 억제하였다. 반응도 계수는 U3Si/Al 핵연료가 장전된 노심과 비슷한 특성을 보여준다. 고밀도 U-Mo 핵연료를 이용한 하나로의 노심변환은 특별한 문제없이 하나로에 추가적인 조사공의 제공과 주기길이의 연장을 가능케 한다.

Abstract

Currently, HANARO is using U3Si/Al fuel of 3.15 gU/cc. To enhance the utilization of HANARO, core conversion using high density U-Mo fuel is studied. Minimal core conversion considered maintains fuel shape and only changes fuel density. U7Mo/Al of 4.0/4.5 gU/cc which has been irradiated at HANARO, and U7Mo/Al of 5.0/4.3 gU/cc for the next irradiation test are

considered. Important reactor physics parameters such as linear heat generation rate, neutron flux, and reactivity, are compared.

A new core model for U7Mo/Al fuel offers additional 4 irradiation sites. U7Mo/Al core give cycle length extension of 16% and 27%, but a little bit of neutron flux decrease. The increase of linear heat generation rate in a compact U7Mo/Al core is suppressed by the optimized design of fuel assembly. Reactivity effects of U7Mo/Al core are similar to the current core. Core conversion using high density U-Mo fuel give additional irradiation sites and extension of core cycle without any significant loss.

## 1. 배경

대부분의 연구용 원자로는 효과적인 연구를 위해 높은 중성자속이 필요하다. 연구로의 핵연료로서 고농축 우라늄을 사용하면 높은 중성자속을 얻는데 유리하기 때문에 연구로의 핵연료는 개발 초창기부터 고농축 우라늄이 사용되어 왔다. 고농축 우라늄의 사용은 핵확산 위험이 있어 저농축 핵연료로 대체하고자 미국이 주축된 RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactor) 프로그램이 1978년에 시작되었다. RERTR 프로그램에서는 농축도를 낮추어 발생하는 문제를 우라늄 장입비율을 높이는 방법으로 해결하려고 한다. 우라늄 밀도가 높으며 연소 안정성이 우수한 우라늄 합금 물질로서 Uranium과 Silicon의 금속간 화합물인 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 또는 U<sub>3</sub>Si가 선정되었다. 1980년 후반부터 고농축의 UAl<sub>x</sub> 핵연료를 저농축 Uranium Silicide 핵연료로 전환하는 사업이 점차적으로 추진되어 현재 연구로의 약 90% 정도가 저농축 Uranium Silicide 핵연료를 사용하고 있다. 하나로도 이러한 배경으로 U<sub>3</sub>Si/Al 핵연료를 사용하고 있다.

Uranium Silicide 핵연료에 대한 지속적인 연구가 이루어졌지만 충분한 정도의 고밀도 핵연료를 만들 수 없었고 재처리가 어려운 새로운 문제에 부딪혔다. 이에 따라 재처리가 용이하고 Uranium Silicide 보다 우라늄 밀도가 높은 물질을 찾는 연구가 착수되었다. 여러 가지 후보물질 중에서 U-Mo 합금이 고밀도의 핵연료를 만들 수 있고 연소 안정성이 우수한 것으로 나타나 RERTR 프로그램에서는 1990년대 후반부터 U-Mo 핵연료의 개발에 집중하고 있다. Mo 함량이 많을수록 연소 안정성이 좋게 나타났으나 Mo 원소는 중성자 흡수단면적이 크고 합금물질의 우라늄 밀도를 저하시키므로 핵연료 용도로 사용 가능한 Mo 최저 함량이 선정되어야 한다. 6wt.%Mo 이상이 사용가능한 안정성을 나타내었으며 이보다 1wt.% 높은 U7Mo/Al이 실용화를 위한 합금조성으로 선정되었다.

하나로의 설계는 Uranium Silicide 핵연료의 개발이 활발한 시기에 이루어졌다. 고성능의 연구로를 만들기 위해 노심 설계할 당시에 가장 높은 고밀도 핵연료로 입

증된 것을 핵연료로 선택하였다. 현재 사용하고 있는 하나로의 핵연료는 3.15 gU/cc의 우라늄 밀도를 갖는 U3Si/Al 핵연료이다. 고밀도의 U7MO/Al 핵연료에 대한 연구가 많이 이루어져 실용화를 위해 조사시험이 이루어지고 있으므로 고밀도 핵연료를 이용한 하나로의 노심변환을 고려해볼 필요가 있다. 고밀도 핵연료를 이용하면 주기길이를 연장할 수 있어 원자로의 이용을 증대시킬 수 있고 소모되는 핵연료의 수를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 하나로의 노심변환

하나로는 1995년 2월 초기임계에 도달한 이후에 여러 분야의 이용을 위해 계속 운전되고 있다. 출력운전으로 노심 구조물이 방사화되어 있기 때문에 노심변환을 위해 노심 구조물을 교체하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문의 노심변환은 핵연료의 외관을 그대로 유지한 상태에서 U3Si/Al 핵연료를 U7Mo/Al 핵연료로 대체하는 것에 한정한다.

### 2.1 노심모형

하나로는 2가지 형태의 핵연료를 사용하는데, 육각형의 외관을 갖는 36봉 핵연료와 원형의 18봉 핵연료이다. 그림 1은 강제 대류에 의해 냉각되어 핵연료가 장전될 수 있는 위치를 개념적으로 표시한 것이다. 그림 1에서 R01~R20에는 36봉 핵연료가 장전되고, CA1~4, SO1~4, OR1,2,7,8에는 18봉 핵연료가 장전된다.

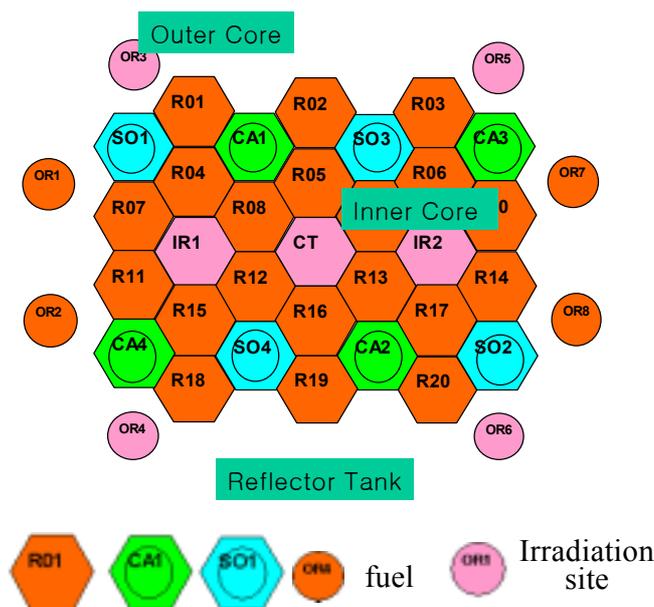


그림 1. 하나로 노심에 대한 개념적인 표시

하나로의 표준노심은 36봉 핵연료가 20개, 18봉 핵연료가 12개 장전된 노심이다. 강제 대류를 필요로 하는 조사시험을 할 수 있는 조사공은 그림 1에서 내부노심(Inner Core)에 3개, 외부노심(Outer Core)에 4개가 있다. 내부노심의 IR1에 핵연료시험설비(FTL, Fuel Test Loop)가 설치될 것이기 때문에 이용 가능한 조사공의 수는 더욱 부족해질 것이므로 추가적인 조사공 확보가 필요하다. 외부노심에 있는 핵연료가 장전되어 있는 위치를 조사공으로 사용할 수 있다면 조사공이 50% 이상 증대되는 것에 해당한다. 핵연료가 장전되는 위치가 줄어들면 주기길이가 줄어들기 때문에 고밀도 핵연료를 이용하여 주기길이를 늘여야 한다. 현재 RERTR 프로그램을 통해 개발되고 있는 고밀도 U7Mo/Al를 이용하면 주기길이를 늘일 수 있다. 최근 하나로의 OR5 조사공에서 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al의 조사가 완료되어 조사 후 시험이 진행되고 있다. 조사된 핵연료의 외관검사서 문제가 없는 것으로 보아 조사시험이 성공적인 것으로 예상된다. 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al 핵연료를 이용하여 하나로의 노심변환을 위한 노심특성분석을 하도록 한다. 하나로 노심변환을 위한 참고 문헌 [1]의 분석에서 5.0/4.3 gU/cc의 U9Mo/Al 핵연료도 하나로 노심변환에 적합한 것으로 나타났다. 우라늄 밀도는 같지만 Mo의 함량이 다르기 때문에 5.0/4.3 gU/cc의 U7Mo/Al에 대한 분석도 같이 하도록 한다.

비교 평가를 위한 노심특성인자는 선출력, 중성자속, 반응도값, 주기길이, 반응도 계수 등이다. 분석에 사용되는 전산코드는 MCNP[2]와 HELIOS[3]이고, 각각의 하나로 전체 노심모델을 이용하도록 한다. 비교 분석 대상에 대한 주요 인자는 표 1에 나타내었다.

표 1. 비교 분석 대상에 대한 주요 인자 (표준/감축)

구분 \ 노심		U3Si/Al 노심 (3.15 gU/cc)	U7Mo/Al 노심 (4.0/4.5 gU/cc)	U7Mo/Al 노심 (5.0/4.3 gU/cc)
핵연료봉	우라늄 밀도 (gU/cc)	3.15/3.15	4.00/4.50	5.00/4.30
	핵연료심 밀도 (g/cc)	5.40/5.40	6.34/6.79	7.25/6.61
	핵연료심 직경 (cm)	0.635/0.549	0.635/0.549	0.635/0.549
	우라늄 선밀도 (gU/cm)	1.00/0.75	1.27/1.07	1.58/1.02
핵연료 다발	36봉 핵연료	18/18	18/18	18/18
	18봉 핵연료	18/0	6/12	6/12
노심	장전 다발 개수	32	28	28
	36봉 핵연료	20	20	20
	18봉 핵연료	12	8	8
	전체 핵연료봉 개수	936	864(0.92)	864(0.92)
	우라늄 장전량 (kg)	58.31	69.35(1.19)	75.76(1.30)

## 2.2 선출력

고밀도 핵연료의 장점을 이용하기 위해 선정된 노심모형은 장전되는 핵연료 다발의 수가 줄어든다. 같은 원자로 출력 30 MW을 내기 위해서는 선출력이 높아질 수밖에 없기 때문에 해결책이 필요하다. 하나로를 설계할 때 36봉 핵연료의 외곽봉에 높은 선출력이 나타나는 문제를 해결하기 위해 외곽봉의 핵연료심 직경을 줄였다. 이와 같이 내/외곽의 우라늄 양을 조절하는 방법을 적용하여 선출력 분포를 평탄화할 필요가 있다. 현재의 18봉 핵연료에 대해서는 출력 평탄화가 이루어져 있지 않기 때문에 하나로 노심의 최대 선출력은 18봉 핵연료에서 발생한다. U7Mo/Al 핵연료의 18봉 핵연료에 출력 평탄화를 적용한다면 선출력이 높아지지 않도록 할 수 있다. 표 1에 보는 바와 같이 U7Mo/Al 핵연료는 36봉 핵연료뿐만 아니라 18봉 핵연료도 외곽봉의 핵연료심 직경을 줄였다. 노심분석을 위하여 모두 새 핵연료가 장전된 가상노심을 선정하였다. 최대 선출력이 발생하는 제어봉 위치를 선정하여 MCNP로 계산하였다. 선출력은 모든 핵연료봉에 대하여 5 cm 단위로 산출하였으며 표 2에 정리하여 나타내었다. 최대 선출력에 대한 계산 오차는 2.5% 정도이다.

표 2. 선출력의 비교 [(1): R01~20, (2): CA1~4, (3): SO1~4, (4): OR1,2,7,8]

노심 \ 비교	우라늄 양의 비 (외곽봉/내곽봉)	선출력 (kW/m) (최대/평균)	선출력 비 (외곽봉/내곽봉)	임계도값
U3Si/Al 노심 (3.15 gU/cc)	0.75 (36봉 핵연료)	89.4/43.1(1) 110.8/39.7(2) 113.8/58.4(3) 87.6/52.3(4)	1.05(1) 1.23(2) 1.26(3) 1.38(4)	1.16856
U7Mo/Al 노심 (4.0/4.5 gU/cc)	0.84	114.0/48.1(1) 114.8/41.1(2) 119.3/59.7(3)	1.18(1) 1.04(2) 1.11(3)	1.16859
U7Mo/Al 노심 (5.0/4.3 gU/cc)	0.65	108.7/48.1(1) 113.4/41.0(2) 115.3/59.4(3)	1.10(1) 0.96(2) 1.03(3)	1.17655

열전달 면적이 줄어들었지만 U7Mo/Al 노심의 최대 선출력은 U3Si/Al 노심에 비해 거의 높아지지 않는다. U7Mo/Al 노심의 핵연료는 36봉 핵연료뿐만 아니라 18봉 핵연료에서도 외곽봉의 우라늄 양이 내곽봉에 비해 작기 때문이다. 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al 노심은 5.0/4.3 gU/cc의 U7Mo/Al에 비하여 최대 선출력이 높다. 이것은 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al 노심이 출력 평탄화가 완전히 이루어지지 않았음을 나타낸다. 현재까지 조사 시험이 이루어진 U7Mo/Al 핵연료 중에서 표준 핵연료봉의 최대 밀도는 4.0 gU/cc이다. 보다 고밀도의 표준 핵연료봉에 대한 조사 시험이 필요하다.

### 2.3 중성자속

하나로는 연구용 원자로이기 때문에 중성자속이 가장 중요하며 현재 이용되고 있는 모든 조사공에 대하여 비교하였다. 비교할 반사체내의 수직 조사공은 IP4,5,11,15, NTD1,2, NAA1,2,3, HTS이며, 비교 영역은 축방향 -35~+35 cm이다. 여기에서 제외한 반사체 내 수직 조사공은 다른 조사공의 중성자속을 높이기 위하여 Al Plug가 설치되어 있기 때문에 나타내지 않았다. NAA2에 대해서는 전체 중성자속을 비교하였으며, 나머지 조사공은 0.625 eV 이하의 열중성자속을 비교하였다. 모든 수평 조사공(Beam Tube)에 대해서는 열중성자속을 비교하였다.

표 3. 중성자속의 비교

비교 \ 노심		U7Mo/Al 노심 (4.0/4.5 gU/cc)		U7Mo/Al 노심 (5.0/4.3 gU/cc)	
		상대 비율	오차 (%)	상대 비율	오차 (%)
반사체 내의 수직 조사공	IP4	0.92	0.9	0.91	0.9
	IP5	0.98	0.8	0.97	0.7
	IP11	1.03	0.7	1.02	0.7
	IP15	0.83	0.6	0.82	0.6
	NTD1	0.80	0.6	0.80	0.6
	NTD2	0.76	0.5	0.76	0.5
	NAA1	0.95	1.6	0.95	1.4
	NAA2	0.98	6.1	0.97	5.6
	NAA3	0.99	0.9	0.99	0.8
	HTS	1.00	1.1	1.00	1.0
수평 조사공 (Beam Tube)	ST1	0.86	4.4	0.81	4.1
	ST2	0.93	4.8	0.90	4.5
	ST3	0.98	4.3	0.96	3.9
	ST4	0.96	4.5	0.99	4.0
	NR	0.87	4.4	0.92	4.1
	IR	0.93	4.2	0.95	3.9
	CN	0.97	4.4	0.95	4.0
노심 조사공 (열/고속 중성자)	CT	1.05/1.13	0.7/1.2	1.03/1.10	0.7/1.1
	IR1	0.99/1.08	0.8/1.3	0.96/1.06	0.7/1.2
	IR2	1.02/1.09	0.8/1.3	1.00/1.09	0.7/1.2
	OR3	0.92/0.88	0.9/3.6	0.93/0.87	0.8/3.4
	OR4	0.94/0.96	0.9/3.9	0.93/0.92	0.9/3.6
	OR5	0.97/0.94	1.0/4.0	0.95/0.94	0.9/3.7
	OR6	1.02/0.98	0.9/3.7	1.01/0.98	0.8/3.4

비교는 실제 이용 위치에서 이루어져야 하지만 사용한 계산 모델로는 불가능하다. Beam Tube는 반사체 탱크를 지나 외부로 연결되는데 반사체 탱크가 끝나는 곳에서 5 cm 떨어진 부분에서 비교하면 실제와 가까울 것으로 기대된다. 노심에서는 조사공으로 이용될 수 있는 위치인 CT, IR1,2, OR3~6에 대해 비교하였다. 노심 조사공은 열중성자뿐만 아니라 고속중성자도 중요하기 때문에 1.0 MeV 이상의

중성자속도 비교하였다. 비교할 조사공에는 모두 모의 핵연료 다발이 장전되어 있으므로 모의 핵연료 다발의 중심 지지봉의 축방향 -35~+35 cm의 영역을 비교 영역으로 설정하였다. 중성자속에 대한 관심은 어떤 조건에서의 최대 중성자속이 아니라 일반적인 노심 상태에서의 중성자속이다. 중성자속의 비교를 위해서는 연소도 29.41%U-235의 하나로 평형노심을 선택하였다. 비교는 U3Si/Al 노심에 대한 상대비로 표시하였으며 표 3에 나타내었다. 오차는 상대비의 오차로 각각의 계산 오차로부터 산출한 것이다.

반사체 영역의 수평 및 수직 조사공에서의 중성자속은 U7Mo/Al 노심이 U3Si/Al 노심에 비해 낮으며 대부분 5% 이내이다. 반사체 영역의 수직 조사공인 IP15, NTD1,2와 수평 조사공인 ST1에서 열중성자속이 약 20% 정도 낮다. 이것은 OR1,2,7,8에 핵연료가 장전되지 않아서 생기는 현상이다. 핵연료 조사시험을 할 때 이 위치에 조사시험 핵연료를 장전한다면 중성자속을 거의 비슷하게 유지할 수 있을 것이다. 노심 조사공인 CT, IR1,2에 대한 고속중성자속은 U7Mo/Al이 약 10% 정도 높아진다. U7Mo/Al 노심은 장전된 핵연료 다발의 수가 적기 때문에 핵분열이 노심에 집중되어 생기는 현상으로 추정된다. OR3~6에 대한 열 및 고속중성자속은 거의 비슷하다. 같은 U7Mo/Al 핵연료이더라도 우라늄 양이 적은 4.0/4.5 gU/cc의 노심이 중성자속이 높지만 차이는 적다.

## 2.4 반응도

선출력과 중성자속도 중요하지만 가장 기본이 되는 것은 반응도 특성이다. 반응도 특성이 현재의 노심과 매우 다르다면 제어장치의 변경이 필요할 것이다. 고밀도 핵연료의 사용은 반응도 삽입효과가 있는데 하나로의 경우에는 추가적인 제어장치의 설치는 거의 불가능하다. 추가 반응도를 제어할 필요가 있다면 가연성 독물질을 사용해야 한다. 가연성 독물질을 핵연료심에 혼합한 핵연료에 대한 연구도 이루어지고 있지만 가연성 독물질의 최후의 수단으로 사용될 것이다. 반응도 특성을 알아보기 위하여 모두 새 핵연료인 가상노심과 평형노심을 대상으로 선택하였다. 제어봉이 완전 삽입, 1/2 삽입, 완전 인출에 대하여 표 4에 나타내었다. 늘어난 우라늄 양에 비하여 반응도 변화는 적으며 제어봉값(Control Rod Worth)의 변화는 5% 미만이다.

표 4. 노심의 반응도값 비교 (괄호의 값은 상대표준오차)

연소도	핵연료 제어봉	U3Si/Al 노심 (3.15 gU/cc)	U7Mo/Al 노심 (4.0/4.5 gU/cc)	U7Mo/Al 노심 (5.0/4.3 gU/cc)
		새 핵연료 노심	완전 삽입 1/2 삽입 완전 인출	1.07899 (0.00025) 1.16856 (0.00024) 1.22919 (0.00023)

평형노심	완전 삽입	0.91981 (0.00023)	0.91905 (0.00023)	0.92517 (0.00023)
	1/2 삽입	0.98838 (0.00024)	0.98518 (0.00023)	0.99109 (0.00023)
	완전 인출	1.05332 (0.00022)	1.04809 (0.00022)	1.05265 (0.00023)

연소에 따른 반응도값의 변화를 살펴보면 주기길이를 추정할 수 있다. 보다 자세한 주기길이는 노심관리방식에 따라 달라지지만 연소에 따른 반응도값의 변화가 주기길이를 비교할 때 대표적인 값이라 할 수 있다. 연소에 따른 반응도값의 변화는 HELIOS를 이용하여 계산하였다. 처음부터 임계도값이 1.0이 될 때까지 조사시간을 비교하였으며 변화하는 모습은 그림 2에 나타내었다. 주기길이는 U3Si/Al 노심에 대하여 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al 노심은 16% 늘어나고 5.0/4.3 gU/cc의 U9Mo/Al 노심은 27% 늘어난다. 우라늄 장전량이 각각 19, 30% 늘어난 것을 생각할 때 주기길이는 우라늄 장전량과 비슷하게 나타난다.

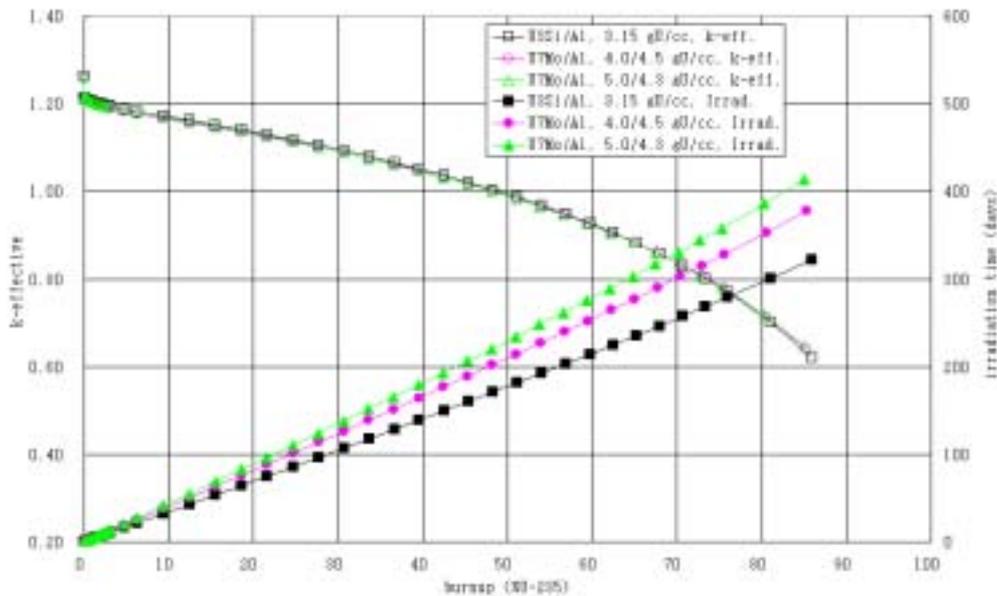


그림 2. 연소도에 따른 반응도 변화와 조사시간

여러 가지 반응도 계수 중에서 문제가 될 수 있는 것은 온도계수이다. 핵연료, 감속재, 반사체 등의 온도가 같이 변화할 때의 반응도 변화를 알아보았다. 각각의 세부적인 온도계수가 아닌 등온온도계수이다. 온도에 따른 반응도값의 변화는 HELIOS를 이용하여 계산하였다. 온도 변화 영역은 20~50℃이며, 온도변화에 따른 임계도값 변화를 그림 3에 나타내었다. 출력 운전 때의 냉각수 평균온도인 35℃를 기준으로 산출한 등온온도계수는 -0.07126 mk/℃ (U3Si/Al), -0.004471 mk/℃ (U7Mo/Al, 4.0/4.5 gU/cc), -0.04429 mk/℃ (U7Mo/Al, 5.0/4.3 gU/cc)이다.

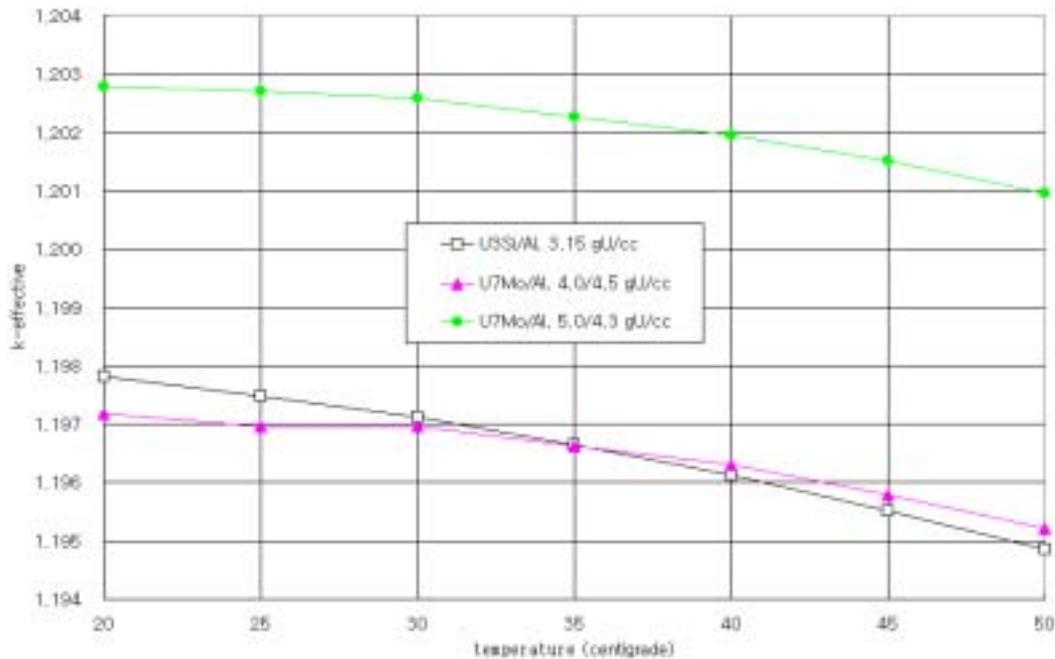


그림 3. 온도변화에 따른 반응도 변화

### 3. 결과 및 토의

하나로 핵연료를 3.15 gU/cc의 U3Si/Al 핵연료에서 4.0/4.5 gU/cc 또는 5.0/4.3 gU/cc의 U7Mo/Al 핵연료로 바꾸는 노심변환을 위해 노심특성을 분석하였다.

최소 변화를 갖는 노심변환을 위해 핵연료 외관은 그대로 유지하고 핵연료의 밀도를 변화시켰다. 4개의 수직 조사공이 추가된 노심모형에 대하여 선출력, 중성자속, 반응도값 등을 살펴보았다.

사용하는 핵연료의 수가 줄어들어 열전달 면적이 8% 작아지지만 핵연료 설계를 개선하여 선출력 증가를 억제할 수 있다. 최근에 하나로에서 조사가 이루어진 4.0/4.5 gU/cc의 U7Mo/Al 노심보다 아직 조사가 이루어지지 않은 5.0/4.3 gU/cc의 U7Mo/Al이 출력 평탄화가 잘되어 있어 선출력이 낮다. 이 결과로부터 4.0 gU/cc 이상의 표준 핵연료봉에 대한 조사시험이 필요하다는 것을 알 수 있다.

노심 조사공에서 고속중성자속은 10%, 열중성자속은 5% 증가하였다. 반사체 영역의 수직 및 수평 조사공에서의 열중성자속은 대부분 5% 미만으로 낮게 나타난다. 수직 조사공인 IP15, NTD1,2와 수평 조사공인 ST1에서 열중성자속이 약 20% 정도 낮다. 이것은 OR1,2,7,8에 핵연료가 장전되지 않아서 생기는 현상으로 중성자속을 높이기 위해서는 핵연료의 장전이 필요하다. 핵연료를 조사시험할 때 이 위치에 조사시험 핵연료를 장전한다면 중성자속을 거의 비슷하게 유지할 수 있을 것

이다.

노심의 반응도값 변화는 미미한 것으로 나타났다. 우라늄 양은 늘어났지만 Mo의 중성자 흡수로 반응도값의 변화는 작은 것으로 생각된다. 대표적인 반응도계수인 등온온도계수는 현재의 핵연료가 장진된 노심과 거의 비슷한 특성을 나타내어 준다. 주기길이는 우라늄 양과 거의 비슷하게 늘어나며 현재의 노심과 비교하여 16 및 27% 정도의 이득을 볼 수 있을 것으로 예상된다.

고밀도 U7Mo/Al 핵연료를 이용한 하나로의 노심변환은 특별한 문제없이 하나로에 추가적인 조사공의 제공과 주기길이의 연장을 가능케 한다. 즉 하나로의 이용을 증진시킬 수 있고 핵연료의 소비를 줄여 경제성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 하나로의 노심변환을 위한 추가적인 조사시험이 이루어져야 하며 노심변환을 위한 구체적인 안전성 분석이 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

## 참고 문헌

- [1] K.H. LEE et al, "A Study on HANARO Core Conversion Using U-Mo Fuel," 6th International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management, March 2002.
- [2] J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab. 1993.
- [3] E. A. Villarino, R. J. J. Stamm'ler, A. A. Ferri, J. J. Casal, "HELIOS: Angularly Dependent Collision Probabilities," *Nucl. Sci. & Eng.*, 112, 16. 1992.