2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료 조사시험시 SPND를 이용한 중성자속 측정 및 평가 연구

A Study on the Measurement and Evaluation of Neutron Flux using SPNDs during Nuclear Fuel Irradiation Test

손재민, 김봉구, 오종명, 박승재, 이병호, 서철교, 강영환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

하나로(HANARO, High-flux Advanced Nuclear Application Reactor)에서 핵연료 조사시험을 수행하기 위한 계장기술 개발의 일환으로 SPND(Self Powered Neutron Detector, 자기출력형 중성자 검출기)를 이용하여 조사시험 중 핵연료가 조사되는 위치에서의 중성자속(neutron flux)을 측정하고 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

이 연구를 수행하기 위하여 먼저 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험에 적합한 rhodium type의 SPND와 신호증폭기(amplifier)를 선정하였고, 선정된 SPND를 핵연료 계장캡슐(02F-11K)에 설치하였다. 이 핵연료 계장캡슐은 약 54일에 걸쳐 하나로 OR5 수직공에서의 조사시험이 수행되었으며, 조사시험 기간 중 SPND 출력신호가 성공적으로 수집되었다. 수집된 SPND 신호는 COSMOS Code를 이용하여 평가·분석 되었으며, 그 결과 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다. 이는 핵연료 중심온도 및 원자로 운전 데이터와 함께 핵연료 관련 연구에 유용하게 활용될 것이다.

Abstract

As a part of the development of instrumentation technologies for a nuclear fuel irradiation test in HANARO(High-flux Advanced Nuclear Application Reactor), a study is performed to measure and evaluate the neutron flux at the same position as the nuclear fuel during irradiation test using the SPND(Self Powered Neutron Detector).

To perform this study, rhodium type SPNDs and amplifier are selected suitable to irradiation test, and the selected SPNDs are installed in instrumented fuel capsule(02F-11K). The irradiation test using a instrumented fuel capsule are performed in the OR5 vertical hole of HANARO for about 54 days, and SPND output signals are acquired successfully during irradiation test. Acquired SPND signals are analyzed and evaluated as a reliable data by COSMOS Code, and this will be utilized

for the fuel related research together with fuel center temperature and reactor operation data.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 핵연료에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위하여 필수적으로 요구되고 있는 하나로의 주요 이용설비 중에 하나인 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 개발하고, 이의 성능시험을 완료하였다.[(1)(2)]

연구로에서의 핵연료 조사시험을 위한 계장은 조사시험 중 핵연료의 노내 거동 연구 및 설계자료의 확보를 위해 이용되고 있다. 이에 따라 1960년대부터 연구로를 보유한 각국에서는 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성측정을 위해 다양한 계장기술을 개발하여 이용해오고 있다. 계장을 통하여 핵연료 조사시험 중 측정할 수 있는 특성으로는 핵연료 노내 성능과 관련이 있는 핵연료 중심 및 표면온도, 피복관 표면온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이 변화, 피복관의 직경 및 길이 변화와 산화층 두께변화, 그리고 중성자속 등이 있다. 이러한 계장기술들이 개발됨에 따라 연소에 따른 핵연료의 노내 거동을 직접 확인할 수 있고, 여기서 수집된 자료들은 핵연료 설계와 관련된 연구에 많은 정보를 제공하게 된다.

따라서, 계장캡슐을 활용하여 핵연료 조사시험 중에 SPND를 이용하여 중성자 속을 측정하고, 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구는 핵연료의 선출력을 보정하기 위한 목적으로 수행되었으며, SPND를 이용한 핵연료의 중성자속 측정 기술은 핵연료 중심 온도 측정 기술과 함께 02F-11K 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 적용되어 2003년 3월부터 5월에 걸쳐 약 54일간 하나로의 OR5 조사공에서 활용되었다.[(3)]

본 논문에서는 핵연료 계장캡슐을 이용한 조사시험에 적합한 rhodium type SPND와 신호증폭기(amplifier)의 선정, 핵연료 계장캡슐에 SPND를 설치하기 위한 방법, SPND 신호의 수집과 수집된 신호의 평가 내용을 상세하게 기술하였다.

2. SPND와 Amplifier 선정

SPND는 일반적으로 그림 1과 같이 emitter, collector, insulation 및 lead wire (compensator)로 구성되어있다. SPND의 특성은 emitter의 성분에 의하여 분류되는데 주로 rhodium(Rh), vanadium(V), cobalt(Co), hafnia(Hf), platinum(Pt), silver(Ag) 등이 사용된다. 그 중에서 중성자속을 관찰하기 위해서는 rhodium과 vanadium이 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다. 그리고, SPND를 선정하는 기준은 sensitivity, response time), 연소도(burn-up rate)와 사용수명(lifetime) 등이 있다. 조사시험용 핵연료 계장캡슐(02F-11K)에서 실제로 사용된 SPND는 Medholm Medical (구 Studsvik)사에서 제작된 rhodium type을 선

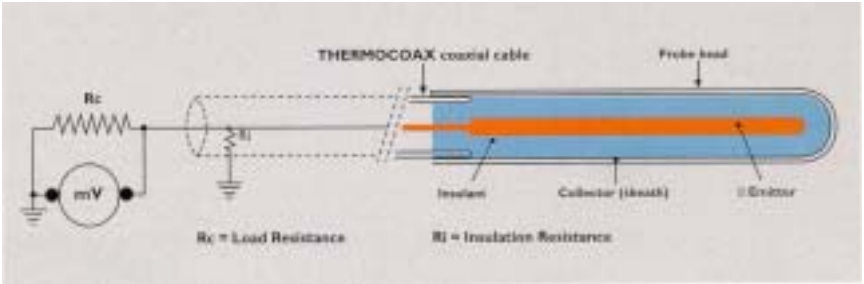

그림 1. SPND 개념도

정하였다. 그 이유는 rhodium type SPND의 response time은 68 sec로 vanadium type의 324 sec보다 월등히 빠르고, burn-up rate가 vanadium에 비하여 32.5배 높지만 조사시험 예정 기간인 약 54일 동안 사용하는데는 문제가 없기 때문이었다.(4) Rhodium의 burn up rate가 열 중성자속(thermal neutron flux)이 10^{13} n/㎠·sec일 때 0.39 %/month이므로, 02F-11K 핵연료 조사시험용 캡슐과 같이 열중성자 속이 3.3 x 10^{14} n/㎠·sec인 하나로의 OR5 수직공에서의 조사시험 수행에 사용될 경우 Rhodium type SPND의 life time은 309일이 된다. 따라서, 선정된 SPND의 emitter는 rhodium, insulator는 Al_2O_3, collector는 inconel 600으로 되어있으며, 각각의 emitter dimension, sensitivity, 그리고 절연저항은 표 1과 같다. 그리고, 이 SPND에는 원자로 수조 상부까지 신호를 전달하기 위하여 20 meters의 MI(mineral insulated) cable이 연결되어 있으며, cable 끝에는 LEMO connector FFA 1E302가 부착되었다.

표 1. 핵연료 계장캡슐(02F-11K)에 사용된 SPND 사양

(E : Emitter D : Compensator C : Collector)

SPND S/N	Emitter		Detector Outer Dia. [mm]	Sensitivity [A/nv]	절연저항 [Ω]	
	Diameter [mm]	Length [mm]			at 20℃	at 400℃
Rh-89	0.7	60	2.5	$1.017x10^{-20}$	〉10^{12}	E-C:$1.7x10^{8}$ D-C:$1.9x10^{8}$
Rh-90	0.7	60	2.5	$1.053x10^{-20}$	〉10^{12}	E-C:$1.6x10^{8}$ D-C:$1.8x10^{8}$
Rh-91	0.7	60	2.5	$1.064x10^{-20}$	〉10^{12}	E-C:$1.8x10^{8}$ D-C:$2.2x10^{8}$

SPND의 건전성은 절연저항을 측정하여 판단하는 것이 유일한 방법이므로, SPND를 캡슐 내부에 조립하기 전과 캡슐을 하나로에 장입한 후에 Hewlett Packard사의 4329A High Resistance Meter를 사용하여 절연저항을 측정하였으며, 이 결과는 표 2와 같다. 이때 절연저항은 emitter와 compensator, compensator와 collector, collector와 emitter의 3경우를 측정하였다.

표 2. 핵연료 계장 캡슐(02F-11K)에 장착된 SPND 절연저항 측정값

SPND No.	구분	절연저항 측정값(Ω)	
		캡슐 조립 전	캡슐 장전 후
SPND Rh 89	Emitter-Compensator	0.7 x 10^{11}	0.7 x 10^{11}
	Compensator-Collector	2.5 x 10^{10}	1.2 x 10^{10}
	Collector-Emitter	3.0 x 10^{11}	1.0 x 10^{10}
SPND Rh 90	Emitter-Compensator	1.0 x 10^{12}	1.2 x 10^{11}
	Compensator-Collector	2.0 x 10^{11}	1.5 x 10^{10}
	Collector-Emitter	3.0 x 10^{11}	1.2 x 10^{10}
SPND Rh 91	Emitter-Compensator	0.6 x 10^{9}	2.0 x 10^{10}
	Compensator-Collector	1.0 x 10^{11}	1.5 x 10^{10}
	Collector-Emitter	1.5 x 10^{11}	0.8 x 10^{9}

이 SPND의 신호증폭기도 스웨덴의 Medholm Medical(구 Studsvik)사가 제작한 DC Amplifier 4695A를 사용하였다. 이것은 4채널의 SPND 저준위 전류신호를 입력으로 받아들여 0~10V(out), 0~5V(logger), 0~10mV(record), 0~1mA(current out) 등 모두 4개의 서로 다른 신호를 출력한다. 표 3은 DC amplifier 4695A의 사양을 나타내고 있으며, 그림 2는 신호증폭기가 제어시스템에 장착된 실제 모습을 보여주고 있다. 4개의 채널 출력에 대한 gain과 offset의 교정을 제작사에서 제공한 procedure에 의해 수행하였다. 이때 사용된 장비는 DC current source로 KEITHEY 220 Programmable Current Source와 digital multimeter로는 HC-9020을 사용하였다. Gain과 offset의 교정 후 4개의 채널 중에서 선형성(linearity)이 좋은 2, 3, 4번 채널을 사용하여 그림 3과 같이 SPND 신호계통을 구성하였다.

표 3. DC Amplifier 4695A 사양

항 목	사 양
Gain Nominal (Conversion Factor)	0.5 x 10^7 V/A (option) 2 x 10^7 V/A
Fine Adjustment	2 x
Coarse Adjustment	5 x
Compensation Adjustment Nominal	0~1 μA
Response Time	35 msec
Linearity	< 0.25 %
Accuracity	< 0.1 %
Temperature drift referred to the input	< 10 pA/℃
Output	0~10 V 4 Ω 0~5 V 5.1 kΩ 0~10 mV 10 Ω 0~1 mA Adjustable
Power (per unit)	+24 VDC 0.2 A -24 VDC 0.2 A
Size	1 NIM-Module
Input Connector	Lemo RA 2310

그림 2. 핵연료 제어시스템에 장착된 DC Amplifier 4695A

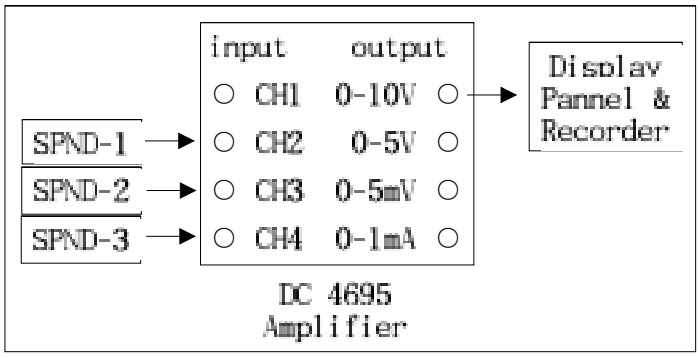

그림 3. SPND 신호 채널 구성도

2. SPND의 설치

핵연료 조사시험용 계장캡슐에는 3개의 SPND가 설치되도록 설계하였으며, SPND를 설치하기 위하여 holder를 설계하여 제작하였다. SPND를 holder에 결합하기 전과 후 사진은 그림 4와 그림 5와 같다.

그림 4. SPND와 Holder (조립전)

그림 5. SPND와 Holder (조립후)

Holder에 결합된 3개의 SPND는 그림 6에 나타난 것과 같이 3개의 핵연료봉과 함께 cooling block에 장착되며, 장착되는 방향은 캡슐 보호관의 가지 방향을 0°로 기준 하였을 때 시계방향으로 0°, 120°, 240°에 위치하도록 설계하였다. 따라서, 핵연료봉은 60°, 180°, 300°에 위치되게 된다. 그리고 SPND의 높이는 핵연료 소결체가 위치한 높이와 일치하도록 하였다. Cooling block에 SPND가 실제로 장착된 모습은 그림 7과 같다

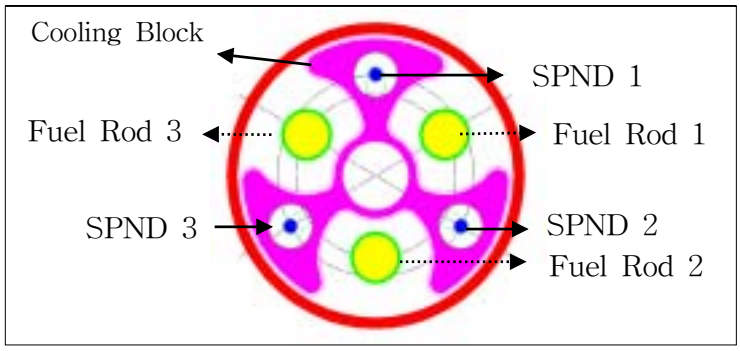

그림 6. SPND와 핵연료봉 설치 위치

그림 6. Cooling block에 설치된 SPND

3. SPND 신호의 수집 및 평가

02F-11K 핵연료 계장캡슐은 하나로 운전 주기로 24-1주기(2003.3.14~3.28, 336 MWD), 24-2주기(2003.4.4~4.18, 336 MWD), 25-1주기(2003.4.25~5.9, 336 MWD), 그리고 25-2주기(2003.5.16~5.30, 336 MWD)의 53.84일 동안 OR5 수직공에서 조사시험이 수행되었으며, 조사시험 기간 중 1분 간격으로 총 77,530개의 SPND 출력신호를 받았으며, 출력 신호의 형태는 0~10,000mV이다. 다음 그림 8, 9, 10, 11은 각 주기별로 수집된 3개의 SPND의 신호와 3개의 핵연료 중심온도, 하나로 출력과 제어봉 위치에 대한 수집된 데이터의 추이를 나타내고 있다. 특기할 사항은 25-2주기에서 SPND중 하나가 절연이 부분적으로 손상되어 출력신호가 약해지는 현상을 나타냈다.

그림 12는 HELIOS를 사용하여 반경방향으로의 핵연료 소결체 내의 미세 출력분포의 계산 결과를 나타내고 있다. 핵연료 소결체 내의 미세 출력분포를 계산하기 위하여 핵연료 소결체를 횡방향으로 그림 13과 같이 영역을 분할하였다. 각각의 단위 영역은 같은 면적을 갖도록 반경을 조절하였다. 미세 출력분포는 3개 핵연료봉의 미세 영역(전체 108개

= 3 x 36)의 평균출력에 대하여 상대값으로 나타내었다.

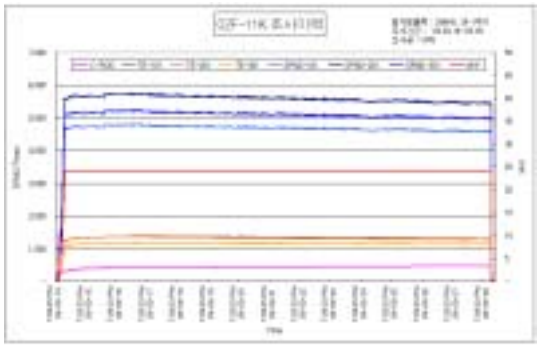

그림 8. 24-1주기 SPND 출력 신호(mV)

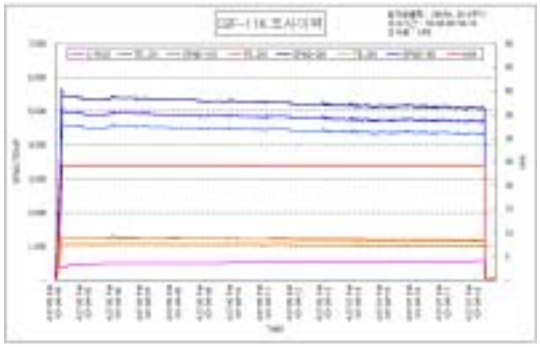

그림 9. 24-2주기 SPND 출력 신호(mV)

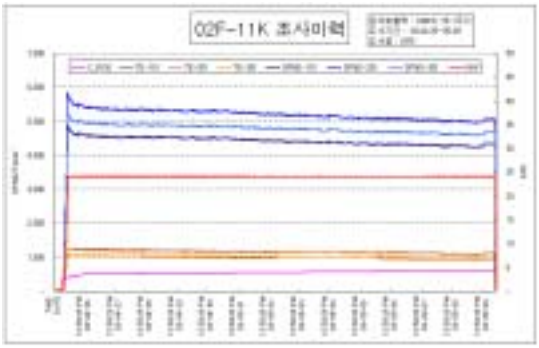

그림 10. 25-1주기 SPND 출력 신호(mV)

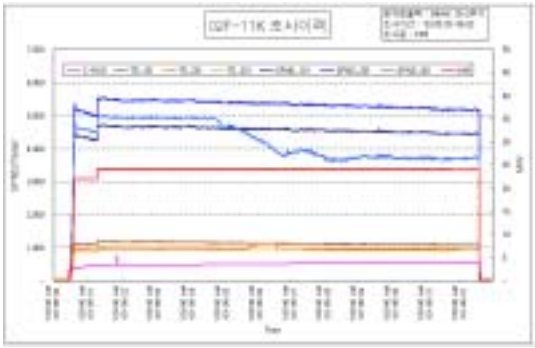

그림 11. 25-1주기 SPND 출력 신호(mV)

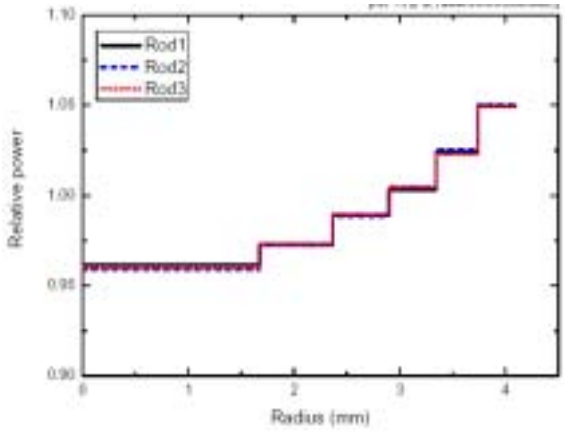

그림 12. 핵연료 소결체 반경방향 상대출력 분포

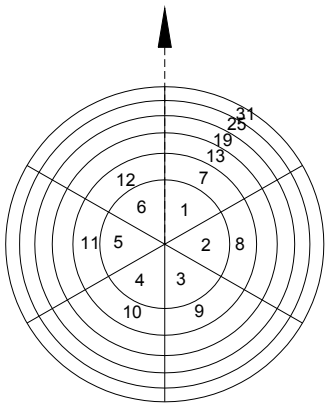

그림 13. 핵연료 소결체의 영역 분할

그림 14는 24-1주기에 하나로 출력이 0부터 24MW까지 상승하는 동안 측정된 SPND 신호와 HELIOS로 계산한 핵연료 반경방향 상대출력분포로 계산된 핵연료 선출력에 따

라 실제 측정된 핵연료 중심온도를 나타내는 그래프이다. 그림 15는 그림 14와 동일한 핵연료 선출력에 따라 COSMOS Code로 계산된 핵연료 중심온도를 나타낸 그래프이다. 이와 같이 측정된 핵연료 중심온도와 COSMOS Code로 계산된 핵연료 중심온도의 두 그래프의 추이가 비슷한 것으로 미루어보아 02F-11K 핵연료 조사시험에서 수집된 SPND 신호와 측정된 핵연료 중심온도는 신뢰성이 높은 것으로 평가할 수 있다.

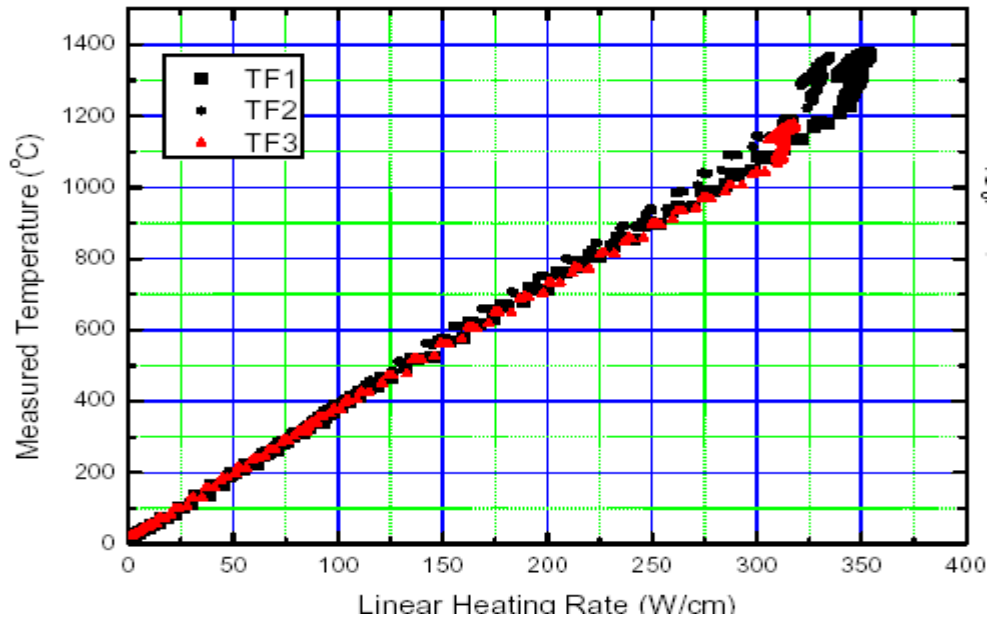

그림 14. 선출력에 따른 온도 변화
(수집된 실제 SPND 데이터 사용)

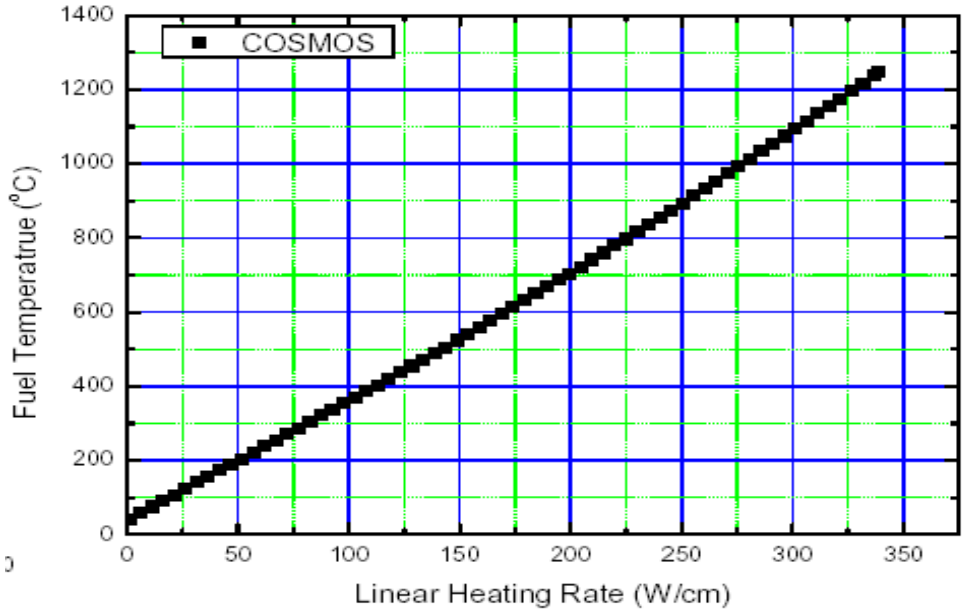

그림 15. 선출력에 따른 온도 변화
(COSMOS Code에 의해 계산)

5. 결론

본 연구에서는 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 활용하여 하나로에서 조사시험 중 SPND를 이용하여 핵연료의 중성자속을 측정하고, 평가하기 위하여 rhodium type의 SPND와 amplifier를 선정하고, SPND를 캡슐 내부에 설치하기 위한 방법을 설계·개발하였으며, 02F-11K 핵연료 계장캡슐의 조사시험을 통하여 캡슐내부에 설치된 3개의 SPND로부터 0~10V 형태의 신호를 성공적으로 수집하였다. 그리고, COSMOS Code를 이용하여 수집된 데이터를 평가하였고, 수집된 데이터는 신뢰성이 좋다는 결론을 얻게되었다.

향후에는 SPND로부터 전압(V)신호 뿐 아니라 전류(A) 신호도 함께 수집할 계획이며, 수집된 자료를 보다 면밀하게 평가하고, 이를 차기 조사시험에 feedback함으로써 점진적으로 보다 신뢰성이 높은 자료를 측정할 계획이다. 또한 현재는 수집된 방대한 량의 데이터를 MS Excel에서 처리될 수 있는 규모로 분할해서 사용하고 있으나, 이를 분할하지 않고 처리할 수 있는 시스템을 구축하여 데이터의 활용가치를 더욱 향상시킬 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과이며, 본 실험을 위해 UO_2 소결체를 지원하여주신 한국원자력연료(주)에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] 강영환외 6인, 2002.4.30, “Fuel Irradiation Capsule Development Status for Advanced Fuel Development in the HANARO”, 한국재료학회 2002년도 춘계학술발표회 논문집

[2] 김봉구외 6인, 2002.9.12, “Development of an instrumented capsule for irradiating nuclear fuel in HANARO”, 한국원자력학회 2002년도 추계학술발표회 논문집

[3] 김봉구외 12인, 2003.3.11, “핵연료 조사시험용 계장 캡슐 (02F-06K/02F-11K) 설계/제작”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-02408/2003

[4] William H. Todt, Sr. “Characteristics of self-powered neutron detectors used in power reactors”, Imaging and Sensing Technology Corporation