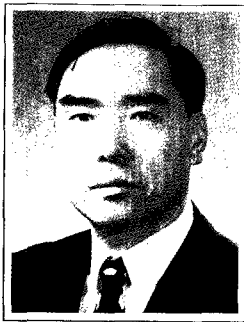


## 국내 원전의 자기출력형 중성자 검출기

하 달 규

삼창기업(주) 중앙연구소 소장



**자** 기 출력형 중성자 검출기 (Self Powered Neutron Detector, SPND)의 개발 역사를 살펴보면, 53년 미국의 Linder와 Rappaport에 의해서 전기 신호용 동축 케이블의 중심도선이 중성자 흡수에 의해 방사화 되고 이 때 방사된 방사성 동위원소의 베타 붕괴 시 방출되는 고에너지의 베타선이 shield선에 도달함으로써 중심도선에는 전자 부족으로 양의 전위, shield선에는 전자 과잉으로 음전위를 갖게

되는 동작 원리를 발표한 이후, 61년 소련의 Mitelman 등이 이 원리를 이용하여 로듐선을 중심도선으로 사용하여 노심내의 중성자속을 측정할 수 있게 되었다.

그러나 실제 원자로 노심 내의 중성자속을 측정할 수 있도록 노심 내 중성자속 검출기(In-Core Neutron Flux Detector)를 개발한 것은 64년 캐나다의 Hilborn에 의해서였다.

이때부터 노심에서 장기적으로 중성자속을 연속적으로 측정할 수 있는 검출기의 개발이 시작되어, 현재는 고정형으로 상용 원자로 노심의 출력과 출력 분포를 감시하기 위해 적용되고 있다.

향후에는 더 우수한 성능과 단수명의 결합을 보완한 제품이 선보일 것으로 전망되고 있다.

이 제품은 현재 전 세계적으로 원전에만 사용되는 특수성 때문에 일부 업체에서만 자기 출력형 중성자 검출기를 제작 판매하고 있으나, 국내에

는 제작 업체가 전무한 상태로 빠른 시일 내에 국산화가 이루어지기를 바라고 있다.

원자력 산업에서 잘 알려진 Westinghouse, AECL, ABB-CE 등에서는 자체 제작보다는 Imaging and Sensing Technology Corporation(ISTC)에서 제작한 검출기를 납품받아 상용 원전에 공급하고 있는 실정이다.

일부 다른 업체의 경우에는 연구용 원자로에 공급하고 있으며, 특히 한 국원자력연구소 내의 '하나로'는 스웨덴의 Studsvik에서 제작한 제품을 사용하고 있다.

국내 경수로 원전에 적용되고 있는 노심과 노외 검출기를 공급하고 있는 ISTC는 Westinghouse와 Reuter Stokes사의 원자력 센서의 한 분과에서 독립되어 88년도에 설립된 회사로서 미국·캐나다에 공장을 두고 있으며 성과와 기술이 타업체에 비해 향상된 제품을 생산하고 있다.

〈표 1〉 국내 원전 ICI 사용 현황

발전소	원자로 형태	검출기 형태	검출기 재료	공급 업체
고리 1·2·3·4호기	경수로	이동형	U-235	Westinghouse
월성 1·2호기	중수로	고정형	Vanadium & Platinum	AECL
영광 1·2호기	경수로	이동형	U-235	Westinghouse
영광 3·4호기	경수로	고정형	Rhodium	ABB-CE
영광 5·6호기	경수로	고정형	Rhodium	ABB-CE
울진 1·2호기	경수로	이동형	U-235	Framatome
울진 3·4호기	경수로	고정형	Rhodium	ABB-CE

상대적인 기술을 보유하고 있는 업체는 Babcock & Wilcox를 전신으로 하여 검출기와 원자로 제어봉, 원전 연료 등을 생산하고 있는 Framatome Cogema Fuels를 꼽을 수 있다.

국내에서는 80년대 한국원자력연구소에서 노심 내 중성자속 검출기 제작에 대한 연구를 수행한 적은 있으나, 1년간의 기술 계약으로 AECL에서 핵심 부품인 검출기를 공급받고 그 의 부품에 대한 규격서·시방서·시험 절차서 등을 공급받아 연구 수행을 하였다.

수행 과정에서는 제작에 필요한 재료 기술·가공 기술 등의 국내 기반 산업 기술이 부족하여 많은 어려움이 따랐고, 제작 후 실제 원전에 설치하여 성능 시험을 하지 못한 상태에서 과제를 마무리 하였으며, 또한 그 후 계속적인 연구 수행이 이루어지지 않아 국내의 기술 자립이 전무하다.

일부 학계나 연구소에서 MCNP Code에 의한 Computer 가상 실험을 하고 있으나 현재 원전에 적용할

정도까지는 도달하지 못하고 있으며, 주로 재료 특성·제작 요소·제작 특성에 관한 이론적인 배경을 제공하고 있다.

국산화된 검출기를 제작하기 위해서는 반드시 제반 기반 기술의 뒷받침이 필요하고, 선제형 초전도체 제작과 특수 목적의 미세 선재 가공 기술이 응용될 수 있다.

그러나 일부 열전대를 제작하고 있는 업체에서 제작 기술이 시스템 열전대와 유사한 점을 고려하여 수년 내에 국산화 가능성을 타진하고 있지만, 이 제품이 사용되는 현장은 안전을 우선으로 하는 원자로의 노심에서 진동과 중성자 조사에 의한 고열과 고온·고압의 냉각수와 접촉되고 있는 악조건의 환경에서 견딜 수 있고, 중성자속을 미세한 전류 측정으로 변환하여 측정하여야 하는 복잡한 하드웨어·소프트웨어가 요구되며, 엄격한 원전 규격에 맞추기 위한 성능 시험, 품질 보증 시험이 필수적으로 추가된다.

이러한 점으로 미루어 모든 기술적

사항을 국내 기술로 소화하기보다는 외국 선진 업체와의 기술 접목으로 점차적으로 국산화를 이루어가는 것이 경제성에 부합되고 짧은 시간 안에 효율적으로 국산화 개발된 노심 내 중성자속 검출기를 국내 상용 원전에 적용하여 기술 확립을 할 수 있다고 판단된다.

이 글에서는 자기 출력형 중성자 검출기의 국내 현황과 기계적·구조적·핵적 특성을 알아보고 우리의 연구 개발 방향을 제시하고자 한다.

### 국내 원전 현황

현재 운전중인 한국 표준형 원전의 경수로와 중수로의 감시 계통을 위해서 노심의 중성자 분포를 측정하는 자기 출력형 중성자 검출기가 많이 사용되고 있다.

이전 발전소에는 이동형 Fission Chamber 검출기가 사용중에 있으나, 한국 표준형 원전 발전소와 차세대 발전소에는 고정형 자기 중성자 검출기 집합체가 채택되었다.

운영 환경은 노심에 설치된 검출기가 신호를 검출하여 In-Core Guide Tube 속의 Signal Cable을 거쳐 신호를 A/D 변환하는 FIDAS로 전달되어 처리된 신호를 COLSS 프로그램과 In-Core Signal Processing 프로그램에 제공하여 원자력의 노심의 환경을 감시하게 되어 있다.

〈표 1〉은 국내 원전에 대한 자기

출력형 검출기를 사용한 노심 내 중성자속 검출기(ICI) 현황이다.

**SPND 작동 원리 및 구조**

**1. SPND 작동 원리**

SPND는 그 이름에서도 알 수 있듯이 별도의 전원 공급을 필요로 하지 않는다.

이는 SPND 내의 Emitter가 방사선과 반응하여 전자를 방출하고 이 전자들이 형성하는 전류를 측정하는데 기인한다.

Emitter는 재료에 따라 그 반응하는 정도와 특성이 다른데 그로 인하여 SPND의 종류도 여러 가지로 나눌 수 있다.

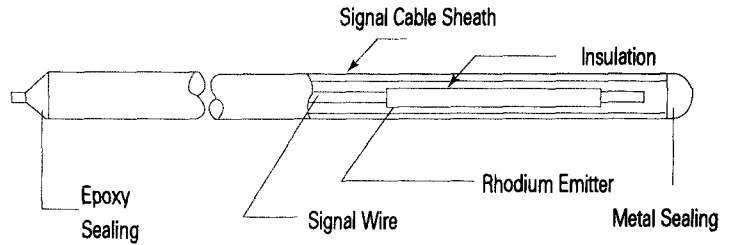
현재까지 개발된 SPND는 그 반응 속도에 따라 크게 2가지로 나눌 수 있는데 그 각각의 원리와 특성은 다음과 같다.

**가. Delayed Response SPND**

Emitter 물질로 주로 Rhodium과 Vanadium을 사용하는데, 이 Emitter는 중성자와 반응하여 전자를 발생한다.

이러한 물질은 중성자 흡수 단면적이 커서 중성자 흡수 반응이 잘 일어나며 이로 인해 생성된 핵종이 베타 붕괴를 수반하므로 전자를 생성한다.

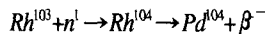
이렇게 생성된 전자는 Emitter를 탈출하여 sheath에 도달하여 신호를 발생시킨다. 이때에 중성자 흡수로 생성된 자핵종의 베타 붕괴 반감기가



(그림 1) 자기출력형 중성자 검출기 구조의 개략도

상대적으로 길어서(수십 초~수 분) 전체 반응 과정을 지연시킨다.

Rhodium의 경우 아래의 반응식과 같이  $Rh^{103}$ 은 145 barn의 열중성자 흡수 단면적을 가지고 있어 중성자 흡수로  $Rh^{104}$ 가 되고 이어 42초의 반감기로 베타 붕괴를 한후  $Pd^{104}$ 가 된다.



**나. Prompt Respond SPND**

Emitter 물질로 주로 Platinum 등을 사용하고 이 Emitter는 감마선과 반응하여 전자를 발생한다.

즉 컴프턴 산란, 광전 효과, 전자 쌍생성 등의 반응을 하고 이러한 반응으로 생성된 전자는 Delayed Response SPND와 같이 sheath에 도달하여 신호를 발생시킨다.

이 때 생성된 전자는 감마선에 대해 즉각적으로 생성되므로 전체 반응이 빠르게 진행된다.

**2. SPND 구조**

전형적인 자기 출력형 검출기는 실제 방사선과 반응하는 Emitter와 이를 감싸고 있는 인코넬 600 튜브와

그 사이에 전기적 절연을 위한 Mineral Insulator 절연체로 이루어져 있다.

이들 구성물들은 Emitter와 인코넬 튜브가 동축으로 배열되고 그 사이에 Mineral Insulator로 채워진 동축 케이블 형태로 구성되어 있다.

Lead 케이블 부분인 인코넬 600 신호선은 로듐 Emitter에 용접에 의한 결합으로 인코넬 600 튜브안에 Alumina Oxide( $Al_2O_3$ )으로 절연되어 구성되어 있으며, Emitter 부분은 길이가 40cm이고 직경이 0.018 인치인 로듐으로 Lead 케이블과 동일하게 인코넬 600 튜브 안에 Alumina oxide( $Al_2O_3$ )로 절연되어 구성되어 있다.

(그림 1)은 Rhodium-자기 출력형 검출기의 단면이다.

**SPND의 특성**

자기출력형 중성자 검출기는 고준위 방사선 감지 장치이다.

원자로 출력은 핵분열에 의하여 생성되며 핵분열은 중성자속에 관계되

(표 2) Emitter 물질의 반응 특성

Emitter 물질	Thermal Neutron Cross section (*barn)	(n, $\beta$ )반응	(n, $\gamma$ ,e)반응	( $\gamma$ ,e)반응
Rhodium	145	x	-	-
Cobalt	37	⊗	x	⊗
Vanadium	4.9	x	x	⊗
Platinum	24	⊗	x	x

x = 1차 반응, (tm) = 2차 반응 \*barn=1\*10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>

(표 3) Emitter 물질의 핵적 특성

Emitter 물질	안정 동위원소	성분(%)	핵반응 단면적 (barns)	반응 핵종	반감기
Rhodium	<sup>46</sup> Rh <sup>103</sup>	100	135	<sup>46</sup> Rh <sup>104</sup>	42 sec
Cobalt	<sup>27</sup> Co <sup>59</sup>	100	37	<sup>27</sup> Co <sup>60</sup>	5.27 years
Vanadium	<sup>23</sup> V <sup>51</sup>	99.76	4.9	<sup>23</sup> V <sup>52</sup>	3.76 min
Hafnia	<sup>72</sup> Hf <sup>177</sup>	18.5	380	<sup>72</sup> Hf <sup>178m</sup>	31 years
	<sup>72</sup> Hf <sup>178</sup>	27.14	75	<sup>72</sup> Hf <sup>179m</sup>	25.1 years
	<sup>72</sup> Hf <sup>179</sup>	13.75	65	<sup>72</sup> Hf <sup>180m</sup>	5.5 hours
	<sup>72</sup> Hf <sup>180</sup>	35.23	14	<sup>72</sup> Hf <sup>181m</sup>	42.4 days
Silver	<sup>47</sup> Ag <sup>107</sup>	51.82	35	<sup>47</sup> Ag <sup>108</sup>	2.42 min
	<sup>47</sup> Ag <sup>109</sup>	48.18	93	<sup>47</sup> Ag <sup>110</sup>	24.4 sec
Platinum	<sup>78</sup> Pt <sup>194</sup>	32.90	2	<sup>78</sup> Pt <sup>195m</sup>	4.1 days
	<sup>78</sup> Pt <sup>195</sup>	33.80	24	<sup>78</sup> Pt <sup>196</sup>	Stable
	<sup>78</sup> Pt <sup>196</sup>	25.30	1	<sup>78</sup> Pt <sup>197m</sup>	1.3 hours

므로 중성자속 분포의 측정이 중요하다.

이런 원자로의 출력에 직접적인 원인이 되는 중성자속을 측정할 수 있는 고준위 방사선 감지 장치로서 자기 출력형 중성자 검출기가 있다.

이 검출기의 원자로 내에서 주요 기능은 다음과 같다.

- ① 각 핵연료 집합체의 연소도 평가
- ② 노심의 열적 여유도 평가

③ 노심 출력 분포에 대한 정보 제공

④ 노심 내의 중성자속 분포에 대한 정보 제공

⑤ 원자로의 출력에 대한 정보 제공

자기 출력형 검출기의 장단점을 다룬 노내 검출기와 비교하면 다음과 같다.

- 가. 장점
- ① 전원 공급이 불필요

- ② 단순한 기계적 구조
- ③ 노내의 온도와 압력에 상대적으로 안정적
- ④ 작은 연소율

나. 단점

- ① 상대적으로 낮은 중성자 민감도에 의한 제한된 작동 범위
- ② Background noise에 대한 신호 보상
- ③ 검출기 재료에 따른 신호 응답의 지연

SPND의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 Emitter의 종류와 그 핵적 특성은 (표 2) (표 3)과 같다.

**자기 출력형 중성자 검출기 개발**

삼창연구소에서는 국산화에 대한 타당성 조사로 외국 업체의 현황과 기술 수준을 파악하기 위해서 외국 제작사를 직접 방문하였다.

방문 결과, 외국 제작진과의 다각적인 기술 협의와 제작 공장을 견학한 결과를 토대로 하여 연구 논문, 설계 및 제작 시방서, Monte Carlo N-Particle Transport Code(MCNP)를 이용한 설계를 근거로 하여 재질과 형태를 결정한 후 제작과 원자로에 적용되는 시험 등을 실시하였다.

**1. MCNP Code 시뮬레이션을 이용한 SPND 설계**

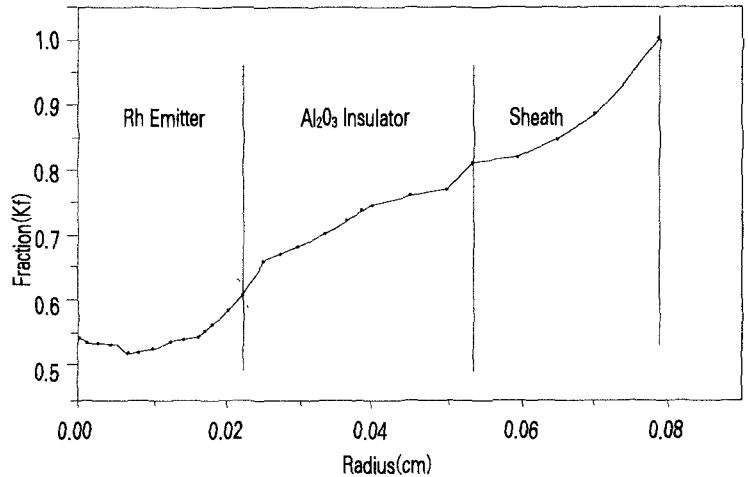
적절한 재질의 선택과 Geometry의 결정, Sensitivity의 계산을 위해

MCNP 시뮬레이션 코드를 사용하여 가상 실험을 하였다.

몇 가지 경우의 SPND를 설계 계산한 결과 Rhodium을 이용하여 축소형 SPND로 제작하였을 때 열중성자에 대해 약  $0.997 \cdot 10^{-21}$  A/nv-cm의 sensitivity를 갖는다.

이는 Warren 등이 계산한 값과 유사하다.

<그림 2>에 MCNP로 계산한 초기 SPND 내의 열중성자 분포를 나타내었다.



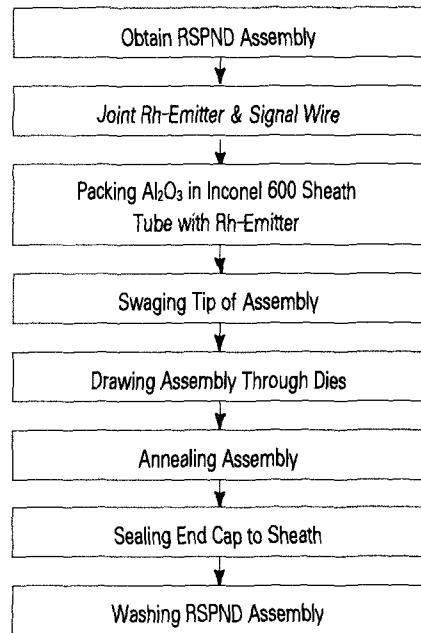
<그림 2> MCNP Code를 이용한 SPND 내의 중성자속 분포 계산

### 2. 중성자 검출기 제작 공정

국내외의 상용 원전에 현재 적용되고 있는 로듐-SPND를 축소형으로 POID법에 의한 선재 가공 기술로 Drawing, Swaging, Annealing 등의 공정을 통해 1 set를 제작하였다.

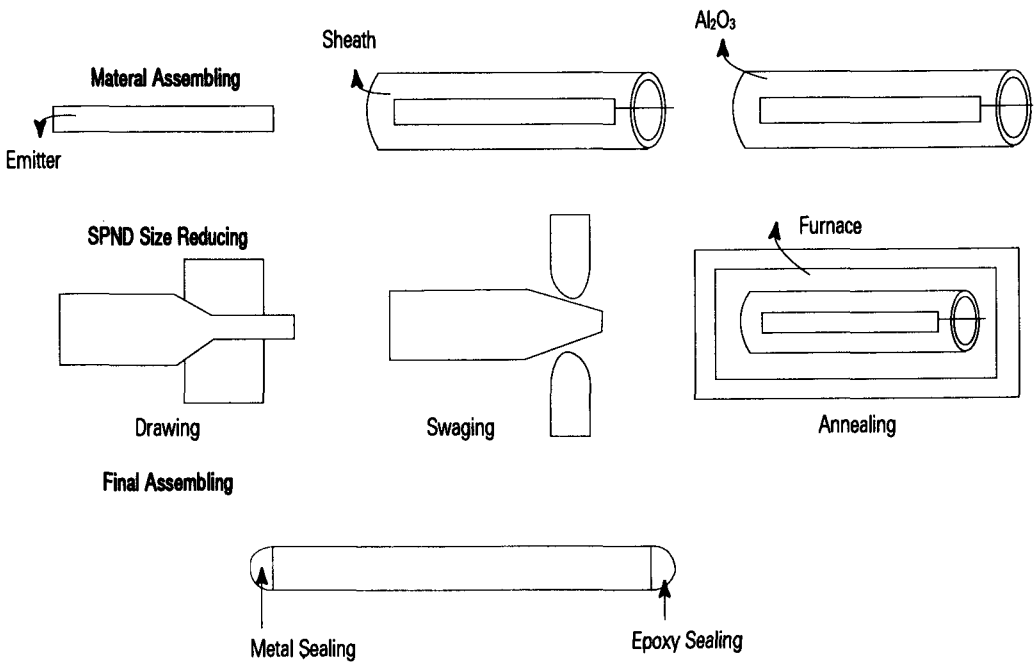
<그림 3> <그림 4>는 연구팀이 제작에 응용한 제작 공정과 흐름도이며 외국 업체와 비교하여 방법상에서는 별다른 차이가 없다고 검토하고 있다.

이 공정에서 원전에 적용될 정도의 검출기를 제작하기 위한 선재 기술 및 절연 기술, 열처리 기술 부분의 공정 기술은 기존의 제작 업체에서는 기술적 내용을 쉽게 공개하지 않는 부분이며, 이 부분만은 외국 선진 업체와의 기술 제휴로 기술 완성도를 높일 수 있다고 판단하고 있다.

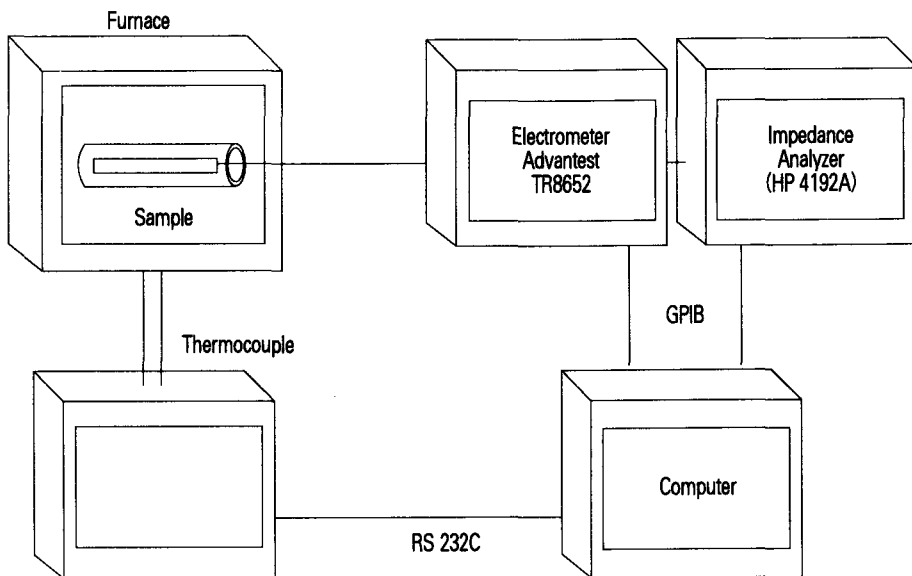


<그림 3> 자기 출력형 중성자 검출기 제작 흐름도

### 3. 중성자 검출기 절연 저항 시험



〈그림 4〉 자기 출력형 중성자 검출기 제작 공정도



〈그림 5〉 자기 출력형 중성자 검출기 절연 저항 시험

검출기의 제작 후 (그림 5)와 같이 Electrometer, HP 4192A Impedance Analyzer로 샘플을 실은 500℃ 온도 구간의 전기로 내에서 Heating과 Cooling를 반복하여 전기적 특성을 측정하였다.

현재 원전에 적용되고 있는 검출기의 절연 저항이  $10^{13} \Omega$  이상을 요구하고 있으나 본 연구팀의 제작품은 (그림 6)과 같이 실온에서  $10^{10} \Omega$  정도이므로 많은 성능이 비교 차이가 나고 있다.

원인으로는 (그림 3) (그림 4)와 같이 제작 공정에서 재료의 순도에도 관련이 있겠지만 공정상의 기술 완성도가 높지 않아서 이러한 결과가 나왔다고 추정하고 있다.

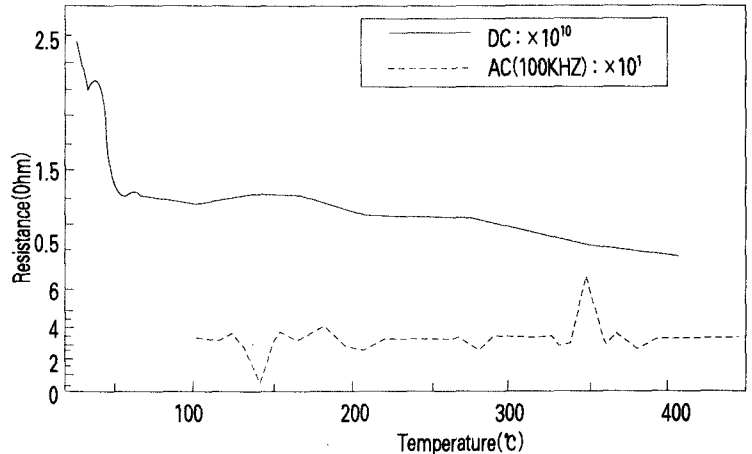
#### 4. 제작 결과

절연 저항 실험과 병행하여 Capacitance 측정과 절연물의 충진도를 관찰하기 위해 X-Ray 회절 실험, Scanning Electronic Microscope(SEM)실험을 하였다.

이러한 실험으로 원전 적용에 요구되는 SPND의 충진도를 평가하였으나, 실험용 원자로에 적용하여 중성자 검출에 대한 실험은 어렵게도 하지 못하였다.

향후에 충진 밀도, 중성자 감도 측정, 헬륨 누출 시험, 액상 침투 실험, 방사선 투과 시험 등을 실시한 후 중성자 감도 측정을 할 예정이다.

제작 성과로는 순수 국내 기술로



(그림 6) 자기 출력형 중성자 검출기의 온도와 저항간의 관계

제작시에 발생할 수 있는 문제점과 시행 착오에 대한 파악과 현재 국내의 제작에 필요한 기반 기술을 점검할 수 있는 기회를 마련하였고, 향후 국산화에 대한 확신을 갖게 되었다.

연구팀은 지금까지의 개발 결과를 토대로 원자로 노심에 설치할 수 있는 In-Core Neutron flux Detector Assembly를 제작할 계획이다.

#### 맺는말

자기 출력형 중성자 검출기는 원자로의 출력에 직접적인 원인이 되는 중성자속을 측정하는 검출기로서 중성자속의 분포 측정, 원자로의 출력 제어, 과출력 방지를 위한 원자력 발전에 필요한 핵심적인 부품으로 한국 표준형 원전의 시조인 영광 3·4호기 및 월성 1·2호기 그리고 시운전중인 울진 3호기와 향후 건설중이거나

설 예정인 모든 원전에 적용될 것이다.

현재 자기 출력형 중성자 검출기의 경우 AECL과 ABB-CE로부터 전량 고가에 수입하여 사용하고 있는 실정으로 년 100억원 이상의 외화가 낭비되고 있으므로 본 연구소에서는 강력한 국산화 개발 의욕을 가지고 96년부터 중성자 검출기 개발팀을 조직하여 현재까지 연구 개발을 하여왔으며 그 성과로 실험용 자기 출력형 검출기를 개발하여 그 결과를 제 74회 한국물리학회에 발표하였다.

향후 본 연구소에서는 국내 원자력 발전소에 적용할 수 있는 품질이 입증된 상용 제품을 국산화 개발하여, 수입으로 인한 외화 낭비를 줄이고 축적된 기술을 바탕으로 동남아시아 및 중국 등의 시장으로 수출이 가능할 것으로 전망하고 있다. ☼