

Special

Thema | 중성자 센서 기술 현황

박세환 선임연구원

(한국원자력연구소 미래원자력기술개발단)
황종선 교수
 (전남도립 남도대학 컴퓨터응용전기과)

1. 서 론

중성자 연구는 다양한 분야와 연관이 있는데, 이를 열거하면 대략 다음과 같다. 첫째, 핵발전소내의 중성자 발생률과 그 공간적 분포를 제공하여 준다. 둘째, 핵융합로의 설계와 운용을 위한 중요한 자료를 제공하여 준다. 셋째, 방사성 물질 처리 관련 분야에서 필수적이며, 이 때 우라늄과 플루토늄의 검출이 특히 중요하다. 넷째, 핵반응률 측정, 암흑물질 검출 등과 같은 기초과학 연구에 필요하다. 다섯째, 보다 나은 중성자 선량계의 개발을 위하여 매우 중요하며, 마지막으로 중성자를 이용한 물성 연구와 깊숙이 연관되어 있다. 이와 같이 중성자는 여러 방면에 걸쳐서 다양하게 사용되고 있으며 특히 중성자를 이용한 산업적 중요성은 최근 점차 커지고 있다.

중성자의 초기의 이용은 주로 핵융합로의 건설에 쓰이는 물질의 성질 탐구에 국한되어 있었다. 그러나 최근 20년 동안 중성자는 산업의 여러 방면에서 널리 쓰이게 되었다. 더욱이 가속기를 이용한 새로운 중성자원의 개발과 중성자 산란을 위한 시뮬레이션 코드의 개발은 중성자를 더욱 광범위하게 쓰일 수 있도록 하고 있다.

82 meV의 에너지를 가진 중성자의 파장은 약 1 Å이다. 따라서 이정도의 에너지를 가진 열중성자를 이용하면 물질내의 밀도의 변화나 격자 구조의 동적 변화 등을 측정할 수 있다. 이 때, 중성자의 탄성산란은 물질내의 밀도 분포와 매우 밀접하게 연관이 있다. 또한 중성자 비탄성산란 반응단면적은 원자의 시간과 위치에 대한 분포와 밀접하게 관련이 있다. 따라서 중성자의 비탄성 산란을 이용하여 원자의 진동주기를 측정하거나 물질내로의 수소의 전파 등에 대한 정보를 얻을 수 있다.

중성자가 많이 쓰이는 분야중의 하나로 중성자 라디오그래피(Neutron Radiography)를 들 수 있다. 즉, 중성자원과 검출기 사이에 시료를 두고서 시료를 통과하는 중성자의 영상을 Gd포일에서 나오는 전자를 이용한 사진판 필름이나 중성자 섬광체를 이용한 카메라 등을 이용하여 찍게 된다. 이 방법은 중성자의 반응단면적이 시료의 핵종에 따라서 다르다는 사실에 기초한 것이다. 최근까지 간편하고 이동하기 쉬운 중성자원을 만드는

것이 이 분야의 가장 큰 결림돌이었다. 하지만 영국의 Oxford Instrument에서는 12 MeV의 수퍼컨덕팅 사이클로트론(Superconducting Cyclotron)을 이용하여 이동이 가능한 중성자원을 개발하였다. 이 장치는 양성자빔을 100 μA 까지를 발생하며 빔이 베릴륨 표적에 입사하여 중성자빔을 만들어내게 된다. 중성자빔은 여러 중성자 감속제를 통과하여 열중성자로 전환되며 이때 실시간 영상을 얻기에 충분한 선량을 가진 중성자가 발생하게 된다. 또한 영상을 위한 간편한 소프트웨어의 개발 역시 이와 병행하여 발전하고 있다.

2. 중성자 검출기 개발 현황

2.1 궤적 검출기(Track Detectors)

이온화된 하전입자가 유전체 내를 지나갈 때 유전체내 전자로 에너지를 전달하게 되며 이 과정에 의하여 하전입자의 경로를 따라서 손상된 분자의 궤적을 만들 수 있다. 특수한 물질의 경우 이 궤적이 현미경등으로 관측되기도 한다. 이 원리를 이용한 검출기를 궤적 검출기라 한다. 이 검출기의 장점은 장치의 단순함, 낮은 가격, 검출기를 작게 만들 수 있다는 점 등을 들 수 있다. 또한 이 검출기는 전자와 감마선에 대한 반응성이 낮으므로 중성자와 감마선을 구분하기 쉽다는 장점을 지니고 있다. 그러나 사용 후 검출기에 만들어진 궤적을 모두 세어야 한다는 단점이 있다. 만약 많은 수의 궤적이 검출기 표면에 만들어질 경우 궤적을 세는데 대단히 많은 시간이 소요되게 된다. 또한 궤적을 만든 입자에 대한 상세한 정보를 이 검출기로는 얻을 수 없다는 점 역시 단점으로 꼽힐 수 있다.

궤적 검출기로 쓰이는 물질로는 대부분이 전기절연체이나, 밴드갭(Band Gap)이 넓은 반도체도 쓰이고 있다. 또한 중성자에 대한 효율을 높이기 위하여 다양한 물질들이 이용되고 있다. 즉, 핵분열성 물질, 폴리에틸렌 또는 리튬을 포함하고 있는 LiF, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 등을 검출기의 앞면에 접합시키기도 한다.

궤적 검출기에 대한 최근 연구는 주로 개인 중성자 선량계 개발을 위하여 많이 이루어지고 있다. 특

히, 보다 낮은 에너지의 중성자에 대한 반응성이 큰 검출기나 중성자의 에너지와 중성자 검출 효율이 무관한 선량계를 개발을 위한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구 성과 중 하나인 CR-39(Polyallyl-diglycol Carbonate)는 1978년 최초로 소개된 이후로 현재 궤적 검출기로써 가장 많이 쓰이는 물질중의 하나이다.

일반적으로 이 검출기를 사용하기 위하여 검출기를 중성자원에 일정시간 노출시켜고 검출기 면을 부식시킨 후 궤적을 검사하게 된다. 검출되는 중성자의 최소 에너지는 사용되는 검출기의 구성물질의 종류, 중성자 전화자의 두께와 종류, 부식 방법 및 궤적을 세는 방법 등에 의하여 결정되게 된다. 검출기를 최적화시키기 위한 연구로서 부식시킨 시간과 검출된 궤적 밀도 사이의 관계를 측정하여 발표하기도 하였다. 또한 검출기를 0.144 MeV에서 66 MeV까지 다양한 에너지의 중성자빔을 이용하여 빔의 입사 방향을 바꾸면서 검출기의 반응에 대한 연구가 이루어지기도 하였다. 중성자 입사 후 부식시키는 방법도 일반적인 화학적 부식법과 전기적 부식법을 이용할 수 있는데, 이 경우 검출기 효율의 변화에 대한 연구가 이루어지고 있다.

선량계는 일정한 에너지 이상의 방사선 선량만을 측정할 수 있는데, 입사하는 중성자의 에너지에 따라서 검출기의 반응이 달라짐을 보인다. 일반적인 궤적 검출기(CR-39)를 사용할 경우 2.5에서 19 MeV 영역의 중성자에 대하여 10^3 정도의 변화를 보이고 있다. 또한 이러한 변화는 중성자 전환자의 종류, 부식의 방법 등에 따라서 차이를 보임이 알려져 있다. 입사하는 중성자의 에너지에 대한 정보를 얻을 수 있는 선량계를 개발하기 위하여 궤적 검출기와 실리콘 다이오드를 결합한 선량계가 제안되고 있다. 반응면적이 3 cm^2 인 PIPS 다이오드에 9V의 전압을 걸은 후 이 다이오드의 앞에 0.5 mm 두께의 폴리에틸렌 중성자 전환자를 위치시키고 이 중성자 전환자를 CR-39 검출기로 싸게 하였다. 이러한 선량계의 중성자 에너지에 따른 반응을 조사하기 위하여 1.2에서 19 MeV까지 중성자를 에너지를 변화시키면서 입사시킨 후 실리콘 다이오드와 궤적 검출기의 반응을 측정한 결과가 발표되었다.

궤적 검출기의 중성자에 대한 반응을 예측하기 위한 시늉내기 역시 행해지고 있다. Y. Nakane은 100 keV - 20 MeV 영역의 중성자에 대한 검출기의 반응을 계산하고 이를 측정한 결과와 비교하여 일치함을 발표하였다.

높은 에너지의 중성자를 이용한 중성자 Radiography를 연구되고 있으며 이를 위한 검출 장비로 궤적 검출기가 시도되고 있다. 일반적으로 열중성자를 이용한 Radiography는 비파괴 검사 등 많은 분야에서 유용하게 쓰이고 있다. 그러나 열중성자의 단점은 두꺼운 철로 이루어진 물질이나, 동물이나 인간의 신체와 같은 경우 투과율이 대단히 낮아서 이용하기가 어렵다는 점이다. 이를 극복하고자 빠른 중성자를 이용한 Radiography가 시도되고 있으며, 영상화를 위한 장비로서 CR-39 분말과 다른 혼합물이 시도되고 있다.

2.2 중성자 영상판(Image Plates)

과거 영상판의 이용은 의료용 X-선 진단, X-선 테스트, X-선 결정학 등 X-선을 이용한 분야에 한정되어 있었다. 이 검출기술을 중성자까지 적용하고자 하는 시도가 꾸준히 이루어 졌다 이러한 연구의 결과로 열중성자 영상을 넓은 영역($> 1000 \text{ cm}^2$)에서 높은 분해능($< 100 \mu\text{m}$)으로 측정할 수 있도록 하는 연구가 이루어지고 있다. 영상판은 일반적으로 Eu를 함유한 BaFBr을 형광체로 쓰이는데, 이 물질에 대한 중성자의 흡수율이 대단히 작기 때문에 다양한 방법들이 쓰이고 있다. 그 중 하나의 방법은 Gd₂O₃ 포일을 사용하는 방법이다. 즉 Gd₂O₃ 막을 일반적인 영상판위에 설치하고 중성자를 입사시키면 Gd에서 중성자가 포획되어 X-선이나 전자 등이 발생한다. 이 때 X-선은 대부분이 영상판을 투과하게 되나 전자는 영상판에서 정지하게 된다. 이렇게 전달된 에너지는 형광체의 전자를 준안정 상태(Metastable State)에 놓이게 한다. 중성자 입사를 마친 후 Red 레이저빔으로 영상판을 스캔하게 되면 준안정 상태의 전자가 Conduction Band로 들뜨게 되며, 전자가 다시 Valence Band로 이동하면서 중성자가 입사한 영역에서 파란색의 빛을 발하게 된다. 이 빛의 강도는 입사한 중성자의 양에 비례하게 되며 이 빛을 측정함으로써 중성자를 이용한 영상을 얻을 수 있게 된

다. 또한 이 검출기는 한번의 측정 후 다시 사용할 수 있다. 이때 위의 방법은 중성자 변환자에서 발생한 상당수의 전자가 영상판까지 이동하지 못하고 Gd₂O₃막에 흡수되어서 영상판의 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위하여 Gd₂O₃을 영상판에 직접 혼합함으로써 효율을 높이고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 이때 영상판의 두께와 Gd₂O₃의 비율을 변화시키면서 검출효율을 측정하는 연구가 보고되고 있다. 또한 중성자 영상을 중성자가 입사한 방향과 그 반대 방향에서 각각 얻은 후 중성자의 입사와 영상화가 같은 면에서 이루어 질 경우 보다 높은 효율을 얻을 수 있음이 보고된 바가 있다[1].

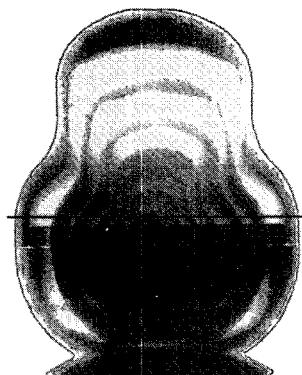


그림 1. 스위스의 Paul Scherrer Institut에 위치한 중성자 발생장치 SINQ와 중성자 영상판을 이용하여 얻은 러시아 나무 인형 "Matroschka"의 영상[1].

⁶LiF가 중성자 변환자로 시도되고 있다. Gd은 중성자 포획 반응률이 높기 때문에 검출 효율이 크다는 장점이 있으나, 중성자와 리슘과의 반응에 의하여 발생하는 하전입자는 에너지가 크기 때문에 리슘을 중성자 전환자로 사용할 경우 감마선과 중성자의 구분이 용이하다는 장점이 있다. 중성자가 물질을 투과할 경우에는 원자 번호가 낮은 핵종과 반응 확률이 대체적으로 높으므로 투과한 중성자는 물질내의 가벼운 핵종에 대한 정보를 가지고 있으며, 감마선의 경우는 원자 번호가 큰 물질과의 반응 확률이 크므로 물질내의 무거운 핵종에 대한 정보를 가지고 있다. 따라서 중성자와 더불어 감마선이 많이 발생

하는 환경 아래에서 중성자에 의한 영상과 감마선에 의한 영상을 구분하면 유리한 경우가 많으며 이 경우 리슘을 전환자로 이용하는 것이 유리하다. 이 때 영상판의 영상은 중성자 선량에 대하여 넓은 영역에서 선형성을 보임이 연구된 바가 있다.

근래 연구의 주요 방향은 Radiography나 Diffractometry 등의 응용에 쓰일 수 있는 영상판의 특성 조사와 최적화가 많이 이루어지고 있다. 스위스의 Paul Scherrer Institut에서는 SINQ 중성자원을 개발하였다. 이 장치는 높은 에너지의 양성자 빔을 입사하여 핵종을 들뜨게 한 후에 그 들뜬 상태에서 나오는 중성자를 중수를 통과 시켜서 여러 에너지의 중성자빔으로 만들어서 공급하는 장치이다. 이러한 빔 라인 중 하나는 중성자 Radiography를 위하여 쓰이고 있으며. 검출기로서 영상판이 시도되었다. 이 중성자 발생장치의 특성을 조사하기 위하여 영상판을 이용하여 중성자빔의 균일도(Homogeneity), 재생성(Reproducibility) 등을 결정하였다. 검출 영상의 공간 분해능을 결정하기 위하여 $25\text{ }\mu\text{m}$ 두께의 Gd을 이용하여 퍼짐을 결정하였는데, $93\text{ }\mu\text{m}$ 의 FWHM을 보고하였다.

Cipriani 등은 생물학과 물성 연구에 쓰일 수 있는 중성자 Diffractometry를 위한 On-line 장치에 영상판을 검출기로 이용하였다. 이 장비는 상업용으로 쓰일 수 있도록 개발된 장치로서 작동의 방식은 다

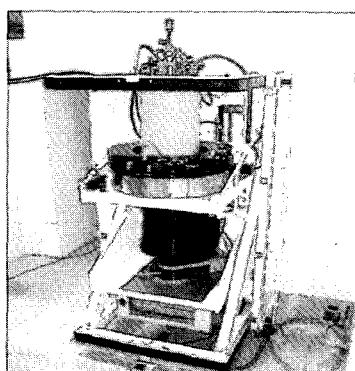


그림 2. 중성자 영상판을 이용한 중성자 Diffractometer[2].

음과 같다. 첫째, 강한 빔으로 영상판에 남아 있는 이전 영상을 지우고, 둘째 샘플에 중성자를 입사시켜서 발생하는 회절 무늬를 영상판에 기록하며 마지막으로 초점이 맞추어진 붉은 레이저 빛을 영상판위로 이동시키면서 각 지점에서 발생하는 파란 빛을 PMT로 관측하게 된다. 이 과정을 통하여 관측되는 각 지점의 값이 컴퓨터에 저장되어 영상화가 이루어 진다. 검출장비의 공간분해능은 $200\text{ }\mu\text{m}$ 으로 알려져 있으며, 검출에 소요되는 시간은 약 2분에서 7분정도이다[2].

2.3 Activation Detectors

대부분의 중성자 검출기가 중성자와 검출기의 즉각적 반응을 측정하는데 비하여 이 검출기는 중성자와 표적 물질에 의한 반응을 검출기로 간접적으로 측정한다. 즉, Activation 검출기는 특정한 지역의 중성자 선량과 에너지 스펙트럼을 표적 물질에 유도된 방사능을 측정함으로써 검출하는 장비이다. 중성자 핵반응률은 낮은 에너지 중성자에 대하여 가장 높으므로 이 검출기는 대부분 열중성자 검출에 많이 쓰인다. 중성자와의 반응률이 큰 물질내에서 중성자의 Mean Free Path가 짧기 때문에 표적의 구조는 얇은 박막이거나 작은 지름의 Wire 형태이다. 검출기의 표적을 고를 때 고려하는 사항은 다음과 같다. 중성자 에너지에 대한 핵반응률을 고려하여야 한다. 즉, 중성자 포획 반응은 낮은 에너지에서 반응률이 가장 크기 때문에 열중성자 측정에 이 반응을 이용하는 것이 적합하며, (n,p) , (n,α) , 혹은 $(n,2n)$ 반응의 경우 중성자 입사 에너지가 특정에너지 보다 낮은 경우 반응이 일어나지 않으므로 이 반응들은 높은 에너지의 중성자를 측정하는데 적합하다. 유도된 물질의 반감기가 너무 길거나 짧을 경우 측정이 어려우므로 이 또한 고려하여야 할 사항이다. 때때로 불순물이 대단히 적은 물질이 요구되기도 하는데 이는 다른 중성자에 의한 반응으로부터의 간섭을 피하기 위해서이다. 유도된 방사성 물질이 감마 붕괴를 하는 경우 보다 측정이 용이함으로 이를 많이 선호한다. 또한 검출기가 쓰이는 환경을 고려하여 표적의 물리적 화학적 성질 역시 고려하여야 한다. 열중성자 측정에 많이 쓰이는 물질로는 망간, 코발트, 구리, 은, 인덕뮴, 금 등이 있으며, 열중성자와 높은 에너지 중성

자의 영향을 구분하기 위하여 카드뮴을 사용하기도 한다. 즉 카드뮴이 0.4 eV 이하의 중성자와는 반응률이 대단히 높고 이 보다 큰 에너지의 중성자와는 반응률이 대단히 작다는 사실을 이용하여, 한 검출기는 카드뮴으로 감싸고 다른 검출기는 카드뮴으로 감싸지 않고 중성자를 입사시킨 후 그 차이를 측정함으로서 열중성자의 효과를 얻어낼 수 있다. 높은 에너지 중성자 검출에 많이 쓰이는 물질로는 플로린, 철, 마그네슘, 알루미늄 등이 있다. Activation 검출기의 장점으로는 제작비가 적게 들고, 장치가 복잡하지 않으며, 물리적으로 견고하며, 보정이 쉽다는 점을 들 수 있다.

최근의 이 검출기에 대한 연구는 핵융합과 핵분열 반응로에서 발생하는 높은 선량하에서의 방사능 검출에 대하여 많이 이루어지고 있다. 토카막 핵융합로 주변의 중성자선속을 측정하기 위하여 핵융합로 진공 용기와 떨어진 위치에 중성자 검출기를 설치한다. 이 때, 이 검출기들의 측정효율을 보정하기 위하여 Activation 검출기가 사용되기도 한다. Al, Ti, Fe, Co, Cu 등의 Activation 막을 중성자 검출기의 위치에 장기간 두고서 표적에 유도된 방사선을 Ge검출기를 이용하여 측정한다. 이를 중성자 검출기의 측정치와 비교하여 검출기의 효율을 보정할 수 있다.

연구용 핵융합로에서 발생하는 에너지 변화를 정확하게 관측하기 위하여 이 검출기가 역시 유용하게 쓰일 수 있다. DT반응에 의하여 발생하는 14 MeV 중성자를 정밀하게 측정함으로써 융합로 내부의 플라즈마 상태를 보다 정확하게 파악할 수 있는데, 이 때 Activated된 표적은 주로 감마선 검출기로 측정되지만, 표적이 핵분열성 물질일 경우 중성자 검출기를 사용한다. 정확한 중성자 스펙트럼을 얻기 위해서는 Activation 검출기의 효율을 정확하게 결정하여야 하는데, 이는 표적핵과 중성자의 핵반응률과 감마 검출기의 효율에 의하여 결정된다. 또한 중성자 스펙트럼에 대한 모델 계산을 통하여 반응로 내의 중성자의 에너지 스펙트럼에 대한 정보를 얻을 수 있다.

핵융합 원자로내의 플라즈마 상태를 측정하기 위하여 14 MeV 중성자와 더불어 $d(d,n)^3He$ 반응에서

발생하는 2.5 MeV 중성자를 측정하여 그 비를 구할 필요가 있다. 이를 위하여 독일의 TEXTOR(Tokamak Experiment for Technology Orientated Research)에서는 주로 BF_3 나 3He Counter, 또는 액체 검출기를 사용하지만 Activation 검출기 역시 정기적으로 사용하여 검출기에 대한 보정을 행한다. 이 경우 샘플을 반응로 안에 넣어서 중성자를 쪼개 한 후에 샘플로부터 나오는 방사선을 HPGe 검출기로 측정하였다. 2.5 MeV 중성자를 측정하기 위하여 인디움, 니켈, 티타늄 등이 이용되었고, 14 MeV 중성자를 측정하기 위하여 실리콘이 사용되었다. MCNP Code를 이용하여 에너지 분포를 예측하였다. 이러한 Activation 검출기와 다른 검출기의 측정 결과로부터 2.5 MeV 중성자 선량을 15 %의 정확도를 가지고 측정할 수 있음이 보고 되었다.

$NaI(Tl)$ 섬광체를 이용하여 중성자 선속이 $1000 n/cm^2$ 정도인 중성자 검출 방법이 시도되고 있다. 이때 이 검출 방법은 아이오다인과 중성자의 핵반응률이 높고 반감기(25 분)가 적합하며, 강한 베타 붕괴를 한다는 사실이 고려되었다.

ITER 핵융합로의 중성자 분포를 측정하기 위한 중성자 카메라의 설계가 고려되고 있다. 이 검출기의 기본 모양은 Fan모양으로 가로축과 세로축의 튜브로 구성되어 있으며, 그 개요도는 그림3과 같다. 이때 중성자의 검출을 위하여 $^{16}O(n,p)^{16}N$ 핵반응을 이용하는 것이 제안되고 있는데, 이 반응의 반응문턱(Reaction Threshold)이 10 MeV 이므로 14 MeV 중성자의 분포를 측정할 수 있다. 표적으로 중류수를 사용하는 것이 고려되고 있다. 액체를 표적으로 사용할 경우 고체 표적에 비하여 위치의 정확도가 떨어지는 단점이 있으나 물은 가장 간편하게 취급할 수 있는 유체의 하나라는 장점이 있다[3].

핵융합로인 JET(Joint European Torus)에서는 다양한 표적 포일을 중성자 조사관 내부로 넣어서 각 위치에서의 중성자의 선속을 측정하고 있다. 특히 $^{54}F(n,2n)^{53}F$ 반응에서 검출되는 377.9 keV 감마선으로부터 유용한 정보를 얻을 수 있다. 이 반응은 측정하기가 그리 쉽지 않은데 그 이유는 ^{54}F 가 자연계에 많이 존재하지 않으며, ^{53}F 의 반감기가 짧기 때문이다. 그리고 이 핵반응의 반응률에 대한 연구가 아직

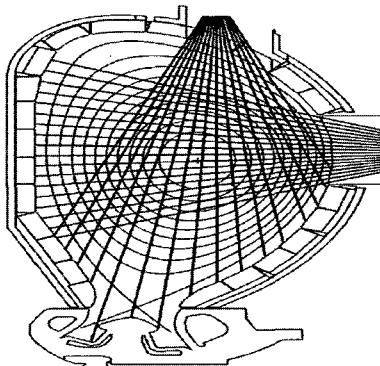


그림 3. 미국의 ITER 핵융합연구로에서 설계한 중성자 카메라의 개요도[3].

은 정확하게 이루어져 있지는 않다. 그러나 이 반응의 반응문턱(Reaction Threshold)이 13.9 MeV 이므로 14 MeV 중성자의 온도에 의한 에너지 펴짐을 이 반응을 통하여 얻을 수 있으며 따라서 플라즈마의 온도를 추측할 수 있다는 장점이 있다.

2.4 감속 검출기(Moderating Detectors)

감속 검출기는 중성자의 속도가 떨어질수록 검출 효율이 커진다는 사실을 이용한 검출기로서 대표적인 검출기로는 Bonner Sphere를 들 수 있다. 이 검출기는 반응이 등방적이며, 열중성자에서 GeV 에너지 영역의 넓은 중성자에 반응을 하며, 작동이 쉽기 때문에 많은 실험실에서 쓰이고 있다. 이 검출기는 1960년대에 Bramblett 등에 의하여 처음으로 설계되었는데, 검출기의 바깥쪽은 중성자 감속 물질로 싸여 있는데, 폴리에틸렌(Polyethylene)이 많이 쓰이며, 검출기의 안쪽은 열중성자 검출기가 위치한다. 주로 ^3He 비례계수기, $^{10}\text{BF}_3$ 비례계수기, ^6Li 유리섬 광체 등으로 되어 있다. 이러한 검출기의 효율은 핵 분열에 의하여 발생하는 중성자에 대하여 잘 알려져 있는데, 일반적으로 10%정도이다.

넓은 영역의 중성자 에너지에 대하여 거의 일정한 효율을 가지는 중성자 검출기나 검출효율이 Dose Equivalent와 거의 동일한 검출기가 제작되고 있다. 이때 검출기가 가장 민감하게 반응하는 중성자의 에너지는 바깥쪽의 감속체의 두께와 관계된다. 감속 검출기를 사용할 경우 대부분 중성자의 에너지

스펙트럼에 대한 정보를 잃어버리게 되는 경우가 많다. 따라서 다양한 두께의 감소구를 이용하여 중성자의 스펙트럼을 구할 수도 있다. 그러나 이러한 측정을 통하여 중성자의 에너지 스펙트럼을 구하는 일은 쉬운 일은 아니며 이의 정당성에 대한 많은 논란이 있어 왔다.

Sokol 등은 ^3He 가스 비례계수기의 외부를 중성자 감속제가 싸고 있는 검출기를 제작하였다. 이 검출기는 핵구조 연구에서 들뜬 핵자로부터 나오는 중성자들의 각분포 관계를 측정하기 위한 장비이다. 각각의 검출기는 육각형으로 되어 있으며, 여러 개의 이러한 검출기가 촘촘히 쌓여져 있는 구조이다. 감속된 열중성자를 ^3He 계수기에서 검출하게 되며 ^3He 계수기는 4~7 atm 정도의 압력을 가하여 준다. 이러한 검출기를 가지고 36%의 검출효율과 각 분포 분해능이 20°가 보고 되었다.

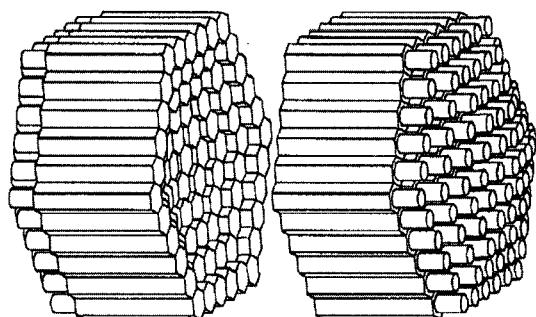


그림 4. Sokol에 의하여 설계된 감속 검출기[4]. 중성자의 감속을 위하여 ^3He 검출기의 외부에 폴리에틸렌 감속제를 두었다.

감속검출기가 핵 구조 연구를 위한 β -delayed 중성자 검출에 쓰이기도 한다. 실험을 위하여 검출기는 감마선에 대한 효율이 낮으나 중성자에 대해서는 검출효율이 높아야 하며, 검출기의 Dead Time이 적어야 한다. 이를 위하여 20 개의 실린더형태의 ^3He 비례계수기가 폴리에틸렌 감속제안에 장착된 구조가 설계되었다. 이 검출기의 외부는 1.5 mm 두께의 카드뮴으로 싸서 열중성자 배경계수를 차단하도록 하였다. 이러한 설계를 통하여 높은 검출효율(29.04

%)을 보고한 바가 있다[4].

산업시설의 방사능 안전을 위한 비파괴 검사를 통하여 플루토늄을 검출하는 방법으로 플루토늄 붕괴시 발생하는 중성자와 감마선을 동시에 검출하는 PNCC(Passive Neutron Coincidence Counting) 방법이 널리 이용되고 있다. 이때 중성자의 검출효율을 높이기 위하여 감속 검출기가 사용되고 있다. 검출기의 구조는 실린더 형태의 고밀도 폴리에틸렌 안에 18 개의 ^3He 비례계수기가 두개의 동심원 형태로 배열된 구조이다. 이 동심원의 중앙에 플루토늄 시료를 두고 그 시료 가까이에 Ge 검출기를 두어서 감마선을 측정하도록 하였다. 검출기의 외벽은 10 cm 의 폴리에틸렌으로 싸서 배경계수를 줄이도록 하였다.

감속 검출기를 사용하여 핵무기처리 등에 관련되는 플루토늄 검출에 가장 최적화된 구조를 찾고자 하는 노력이 시도되고 있다. 검출효율이 높고 중성자 검출기로 널리 쓰이므로 그 특성이 잘 알려진 ^3He 비례계수기가 중성자 계수기로 적합하다. 중성자 감속제로서 경수(H_2O), 중수(D_2O), 흑연(C), 폴리에틸렌(CH_2)등이 시도되었는데, 폴리에틸렌이 동일한 무게에 대하여 가장 큰 효율을 보이며, 쉽게 구할 수 있고, 가공이 용이하며, 구조적으로 안정적이어서 중성자 감속제로서 가장 적합함이 지적된 바가 있다[5].

감속 검출기를 이용하여 중성자의 에너지와 방향성에 대한 정보를 얻고자 하는 시도가 있어 왔다. 즉, 지름이 26 cm인 중성자 감속제의 내부에 지름이 0.5 cm인 세 개의 PSPC(Position Sensitive Proportional Counter)를 x, y, z 방향으로 두었다. 이 때 Counter 내의 기체는 ^3He 와 CF_3 의 혼합체를 넣어 두었다. 각 Counter에서 반응 위치에 대한 정보는 Counter의 양 끝에서 읽히는 전하의 비로 구하도록 하였다. 이 때 각각의 중성자 에너지에 대하여 검출되는 위치에 대한 스펙트럼의 모양 변화를 시뮬레이션 결과와 비교하여 입사하는 중성자의 에너지와 방향에 대한 정보를 얻을 수 있도록 설계되었다.

대기권 밖의 우주에서 중성자의 에너지 스펙트럼을 구하기 위하여 감속검출기가 설계되었다. 이러한 환경에서 중성자와 함께 가장 많이 입사하는 입자가

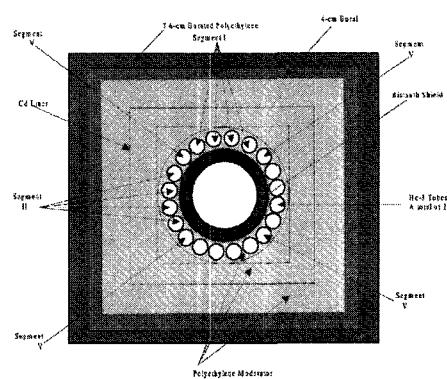


그림 5. β -delayed 중성자 측정을 위한 감속 검출기의 설계. 폴리에틸렌 감속제의 내부에 ^3He 가스 검출기를 두었다.[5]

양성자인데, 가스 검출기를 사용할 경우 중성자와 양성자의 구분이 용이하지가 않다. 따라서 ^6Li , ^7Li 섬광체를 이용한 감속검출기가 설계되었다. 즉 30 cm 지름의 폴리에틸렌 중성자 감속제 내부에 19쌍의 ^6Li , ^7Li 섬광체를 x, y, z 방향으로 배열하여 입사하는 중성자의 방향과 에너지 검출하도록 하였다. 양성자가 입사할 경우 ^6Li , ^7Li 가 반응하지만 중성자는 ^6Li 과만 반응한다는 사실을 이용하여 중성자와 다른 입사 입자를 구분하도록 하였다.

중성자 검출기를 이용하여 핵무기를 탐지하고 그 위치를 파악하는 것은 중요한 응용분야 중의 하나이다. 일반적으로 핵무기로부터는 플루토늄의 자연 붕괴에서 나오는 중성자가 2 MeV 정도의 평균 에너지를 가지고 발생한다. 이러한 중성자를 검출하는 장비는 중성자 감속제 내에 장착한 BF_3 나 ^3H 의 비례계수기이다. 이 때 입사하는 무기로부터 나오는 중성자의 방향성을 구하기 위하여 검출기의 외부를 카드뮴으로 싸고 그 외부는 다시 감속제로 싸게 된다. 이러한 장비는 상당히 크고 무거운 형태를 가지게 된다. 이러한 검출기를 보다 간편한 크기로 만들기 위한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 하나의 방법으로 주변 환경에 의하여 중성자가 감속되므로 이를 특별한 감속제 없이 ^3He 비례계수기로 측정하는 설계에 대한 논의가 있다.

2.5 물방울 검출기(Bubble Detector)

물방울 검출기는 Bubble Chamber와 거의 같은 원리로 동작하는 검출기로서 궤적 검출기와도 유사한 성질을 가지고 있다. 물방울 검출기는 투명한 튜브안의 견고하고 신축성이 있는 폴리머내에 과열된(Superheated) 용액이 고르게 퍼져 있는 구조이다. 폴리머내의 액체는 끓는점이 낮으나 폴리머내의 압력으로 인하여 방사선에 대하여 반응하지 않는 상태를 유지한다. 이 때 용액을 폴리머 밖으로 나오게 함으로써 검출기가 방사선에 반응하게 된다. 입사하는 중성자가 액체분자와 반응하게 되면 이 반응에서 나오는 하전입자의 에너지가 주변을 기체상태로 만들고 이것이 눈에 보이는 물방울을 형성하게 된다. 이 검출기에서 측정되는 물방울의 개수와 입사하는 중성자의 선속사이에는 일정한 범위의 중성자선속에서 선형성을 보임이 발표된 바가 있다[6].

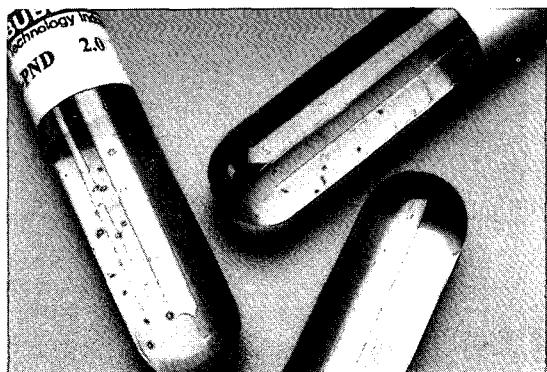


그림 6. 중성자 물방울 검출기 사진[6].

이 검출기를 이용하여 개인선량계로 사용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 특히 방사선 차폐를 한 영역에서 검출기를 이용한 중성자 선량 측정에 대한 연구가 이루어지고 있다. 물방울 검출기의 에너지 의존성, 온도 의존성, 검출기의 안정성, 안정 동적 환경 등에 대한 연구가 여러 곳에서 계속되고 있다. 최근에는 열중성자에 민감한 검출기가 제작되고 있는데, 이 검출기는 폴리머내에 ^{6}Li 화합물을 넣어서 열중성자와의 반응에 의하여 발생하는 삼중수소와 알파 입자의 에너지를 이용한다. 각기 다

른 반응문턱(Threshold)을 가지는 검출기들을 만들어서 중성자의 에너지에 대한 정보를 얻을 수 있는 검출기 역시 시도되고 있다. 이 검출기가 다른 중성자 검출기에 비하여 뛰어난 점은 감마선에 대하여서는 거의 반응을 하지 않기 때문에 중성자와 감마선을 쉽게 구별할 수 있다는 점이다. 특히 감마선의 입사선속이 강한 환경에서도 이 검출기는 반응을 하지 않기 때문에 감마선이 강하고 중성자가 약한 환경에서 적합하게 쓰일 수 있다. 물방울 검출기의 장점이 눈에 띠는 분야는 대기권 밖이나 높은 고도에서 중성자를 측정할 경우이다. 이 경우 배경계수로서 높은 에너지의 양성자가 입사하게 되는데, 물방울 검출기는 양성자에 또한 거의 반응을 하지 않기 때문에 중성자만을 검출할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 비행기 승무원들의 중성자 피폭을 조사하기 위하여 이 검출기를 이용한 실험 결과가 보고된 바가 있다. 물방울 검출기를 이용하여 방사능 피폭량이 많은 군사시설에서 근무하는 과학자들을 위한 선량계, 지표에서 방사능에 오염된 영역을 찾기 위한 검출기, 라돈(Radon)탐지를 위한 검출기 등으로 제작되고 있다. 의료용으로 만들어진 중성자원에 대한 성능조사를 위해서도 이 검출기는 유용하게 쓰이고 있다.

기초과학분야에서도 물방울 검출기의 사용가능성이 지적되고 있다. 현재의 우주론은 상당히 많은 양의 암흑물질의 존재를 예측하고 있다. 전 세계적으로 이 암흑물질을 찾기 위하여 가속기와 여러 첨단 장비를 이용한 대규모 실험이 행해지고 있다. 그러나 아직은 이 물질에 대한 약간의 가능성을 보이는 실험결과만이 발표되고 있는 실정이다. 측정을 위해서는 암흑물질과 검출기내의 물질과의 탄성 산란에 의한 에너지(Recoil Energy)를 측정하여야 하는데 이로부터 유용한 시그널을 얻기 위해서는 약 50 ~ 100 kg의 검출기 제작이 요구된다. 이 경우 기존의 다른 검출기는 모든 입사 입자에 대하여 반응하므로 상당히 많은 배경계수를 검출하게 된다. CCl_2F_2 를 이용한 물방울 검출기가 암흑물질 측정에 이용될 가능성이 최근 제기되고 있다. 이 경우 중성자 이외의 입자에 의한 배경 계수를 상당히 줄일 수 있으며 중성자에 의한 배경계수는 검출기를 지하에

두고 겹출기주변을 적합한 물질로 감싸므로 줄이는 방법이 구상중이다.

2.6 탄성 산란 양성자 검출 장치(Proton Recoil Instruments)

입사하는 중성자의 에너지를 수소를 포함한 얇은 물질 내에서 중성자와 탄성 산란한 양성자의 에너지와 방향으로 겹출하는 장치이다. 양성자 에너지를 비교적 정확하게 측정할 수 있으므로 상당히 넓은 에너지 영역의 중성자에 대하여 비교적 정확하게 에너지를 측정할 수 있다. 14.1 MeV 중성자에 대해서 약 1~3%의 분해능을 보이며, 1 MeV 미만의 중성자와 1 GeV 이상의 중성자 역시 겹출하기도 한다. 겹출 효율이 떨어진다는 점이 이 겹출기의 단점으로 꼽힐 수 있다.

핵융합로의 플라즈마 온도를 측정하기 위하여 14 MeV 중성자를 측정하기 위한 겹출기가 설계되고 있다. 현재 온도측정을 위하여 큰 토카막에서 널리 쓰이는 장비로는 CXRS(Charge Exchange Recombination Spectroscopy)를 들 수 있다. 핵융합로내의 높은 온도의 플라즈마 상태에서 모든 원자가 완전하게 이온화되어 있다. 따라서 이러한 원자로부터 어떠한 Radiation도 발생하지 않는다. 만약 중성의 원자빔을 플라즈마내로 입사시키면 이 빔의 원자와 플라즈마의 이온사이에 전자를 주고받게 되며 이로 인하여 Radiation이 발생하게 된다. 이 때 이 Radiation은 이온의 운동에 의한 Doppler 효과로 인하여 스펙트럼의 모양이 변화하게 되며 이를 통하여 플라즈마의 온도를 알 수 있게 된다. 이러한 방법을 CXRS라 한다. 이 경우 진단을 위한 빔이 반응로 내의 중심까지 미칠 수 없다는 점과 이 장비에 쓰이는 광학장비들이 방사선에 의하여 쉽게 손상이 된다는 점 등이 단점으로 꼽힌다. 이 장비에 대한 대안으로 양성자 탄성 산란을 이용한 겹출기가 설계되고 있다. CH₄ 가스를 채운 비례계수기와 계수기내에서 중성자와 반응한 양성자의 에너지를 측정하기 위한 실리콘 겹출기를 사용한 구조이다. 양성자가 비례계수기에서 잃어버린 에너지와 실리콘 겹출기에서 잃어버린 에너지로부터 입사중성자의 에너지를 얻을 수 있다[7].

Joint European Torus에서는 중수소와 삼중수소

의 플라즈마 상태를 관측하기 위한 14 MeV 중성자 스펙트로메터를 설계하였다. 이때 양성자 탄성 산란의 에너지를 측정할 경우 장치가 비교적 간단하므로 이를 이용하였다. 즉, 양성자 탄성 산란을 일으키기 위한 플라스틱 필름과 반응에 의한 양성성자를 측정하기 위한 실리콘 겹출기를 사용하였다. 이 때 필름과 실리콘 겹출기를 연달아 3 쌍을 두어서 겹출효율을 높이고자 하였다. 이 겹출기의 뒤편에는 양성자 이외의 입자를 측정하기 위한 겹출기를 두어서 장치 내의 방사능 배경계수를 알 수 있도록 하였다.

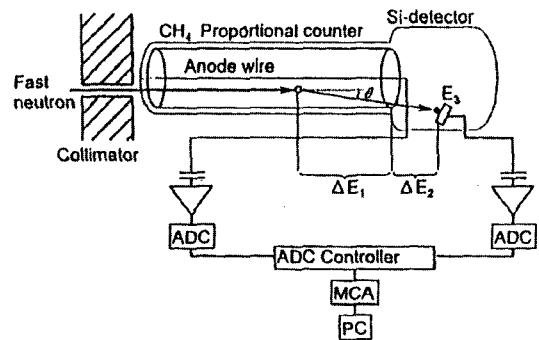


그림 7. 핵융합로의 온도를 측정하기 위한 중성자 겹출기의 설계[7].

ITER(International Teranuclear Experimental Reactor)에서는 노내의 온도를 측정하기 위한 겹출 장비를 개발하였다. 반응로에서 나오는 중성자를 겹출기로 입사시키기 위하여 폭 3 cm, 길이 20 cm의 구멍을 만들었으며, 입사하는 중성자와 평행하게 넓은 면적의 수소표적을 만들었다. 얇은 폴리에틸렌 막이 수소표적으로 이용되었다. 중성자 입사방향에 빗겨서 여러 개의 실리콘 겹출기를 두어서 양성자를 겹출하도록 하였으며, 실리콘 겹출기와 수소표적 사이에는 마이크로채널판(Microchannel Plate)을 두어서 겹출기의 양성자 입사방향을 한정하여 주었다.

입사하는 중성자의 방향을 보다 정확하게 측정하기 위한 설계 역시 고려되고 있으며, 양성자 측정을 위한 다양한 겹출기가 시도되고 있다. 즉, 수소 표적과 겹출기사이에 중성자 입사 방향과 평행한 슬릿을 두어서 슬릿과 평행한 방향으로 입사한 중성자에 의

해서 산란된 양성자만이 측정되도록 하였으며 CsI(Tl) 섬광체의 시간적 특성이 반도체 검출기에 비하여 우수하기 때문에 CsI(Tl)을 PMT와 함께 양성자 측정에 사용하였다.

양성자의 에너지를 측정하기 위한 장치로써 자기 스펙트로미터를 사용하기도 한다. 즉, 중성자와 액체 양성자 전환자의 반응에서 발생한 양성자를 자기 쌍극자와 자기 사중극자를 통과하여 입사입자의 운동량을 측정하도록 하였으며, 섬광체를 양성자 전환자와 스펙트로메터 뒤에 두어서 입사하는 양성자의 속도를 측정하도록 하였다.

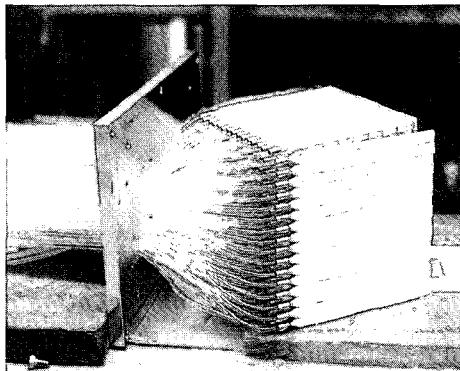


그림 8. 우주선 검출을 위한 중성자 검출기[8].

이러한 기존의 검출기 설계 이외에도 다양한 검출기가 제작되고 있다. Imaida 등은 태양에서 발생하는 중성자의 에너지, 발생시간, 방향을 관측하기 위한 검출기를 개발하였다. 이때 중성자와 함께 많은 감마선이 함께 발생하기 때문에 감마선과 중성자를 구분하기 위하여 NaI와 CsI 섬광체는 성공적이지 못하였다. 중성자 센서는 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 의 크기를 가지며, 춤춤히 모여진 플라스틱 섬유 섬광체로 이루어져 있다. 이 때 하나의 섬유 섬광체는 $3 \times 3\text{ mm}$ 의 크기이며, 이들 섬광체 사이에는 다른 흡수체를 두지 않았다. 중성자가 섬광체와 반응하여 양성자가 발생하며 이 양성자의 방향과 에너지를 측정함으로써 입사하는 중성자의 방향과 에너지를 얻게 된다. 이 검출기의 표면에는 하전 입자 검출판을 두어서 입사하는 하전입자는 구분할 수 있도록 하였다. 섬광체에서 발생한 빛은 광섬유를 거쳐서 두개

의 PMT로 전달되며, PMT 양극에서 나오는 신호를 처리함으로써 필요한 중성자에 대한 필요한 정보를 얻게 된다. 이 검출기는 14 MeV 이하의 중성자에 대해서는 발생하는 양성자의 에너지가 너무 작기 때문에 필요한 정보를 얻을 수 없다고 하며, 이 검출기의 검출효율은 약 1 % 정도로 예측되며 95 MeV 중성자에 대하여 약 4.1 %의 에너지 분해능이 보고되었다[8].

2.7 시간 비행 장치(Time-of-flight Instruments)

이 검출기는 중성자가 검출기와 핵반응, 핵파쇄 반응(Spallation Reaction), 혹은 핵융합 반응 등을 일으킨 시간에 대한 정확한 정보를 얻어냄으로써 중성자의 에너지를 측정하는 장비이다. 즉, 중성자와 반응이 일어간 시간 간격 정보를 통하여 중성자 에너지 스펙트럼을 얻게 된다.

이 검출기가 많이 쓰이는 분야 중의 하나는 배경 계수가 상당히 높으며 큰 검출효율이 요구되는 환경이다. 따라서 검출효율을 높이고자 하는 다양한 시도들이 행해지고 있다. Muradian 등은 ^{178}Hf 의 중성자 포획 반응률을 측정하기 위하여 시간 비행 검출기를 개발하였으며, 검출기의 효율을 높이기 위한 방법을 연구하였다. 실험 장치내의 자연 배경계수가 상당히 큰 경우 검출기의 효율은 비행거리(L)와 중성자 발생원(Q)의 강도에 크게 의존하게 된다. 따라서 비행거리와 발생원의 강도를 조절함으로써 검출

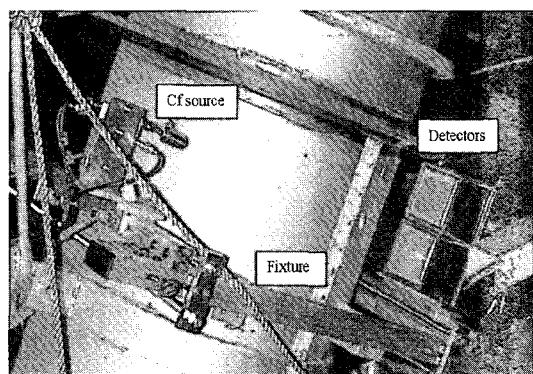


그림 9. 미국의 Oak Ridge National Laboratory에서 개발한 시간비행장치를 이용하여 파이프내의 우라늄 화합물의 퇴적을 측정하는 장치[9].

기의 효율을 크게 변화시킬 수 있다. 이들은 러시아의 Kurchatov Institute 내의 중성자 검출기의 L을 약 2배로 줄이고 중성자 발생원의 강도를 3배 증가시킴으로써 검출기의 효율이 약 350배 증가할 수 있음을 보고하였다.

플라스틱 검출기는 높은 에너지의 중성자를 측정하는데 많이 쓰이는데 검출기와 중성자의 반응 시간이 빠르며, 검출효율이 높은 장점이 있다. 그러나 이 검출기는 중성자와 감마선을 구분하기가 쉽지 않다는 한계를 가지고 있다. 최근 비행시간 방법을 이용하여 중성자와 감마선을 구분할 수 있는 방법이 제안되고 있다. 1 MeV의 중성자는 빛의 속도의 5 %로 이동하며 10 cm의 플라스틱 섬광체내에서 표적핵과 최소한 한 번은 반응할 확률이 90 %이다. 이 때 중성자와 표적의 연속적인 반응 시간 간격은 평균 3 ns이다. 그러나 감마선의 경우 속도가 중성자에 비하여 빠르기 때문에 반응시간에 거의 구조를 가지지 않는다. 이 원리를 이용하여 중성자와 감마선을 구분하기 위하여 빠른 플라스틱 섬광체로부터 나오는 빛을 빠르게 반응하는 PMT에 연결한 후 나오는 신호를 디지털 오실로스코프로 측정한 예비 실험이 행해지고 있다. 이 방법이 실효를 거두기 위해서는 시간적으로 빠른 검출장비와 전자처리 장치가 필요하며, 만약 성공을 거둔다면 이 검출기는 효율적으로 높은 에너지 중성자에 대한 에너지와 시간에 대한 정보를 줄 것으로 기대되고 있다.

Oak Ridge National Laboratory에서는 NMIS(Nuclear Material Inspection System)을 지속적으로 개발하고 있다. ORGDP(Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant)에 위치한 17 ft 길이의 파이프내의 $\text{UO}_2\text{F}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 축적을 측정하기 위하여 ^{252}Cf 을 사용한 비행시간법을 사용하였다. 이 측정을 위하여 감마선만이 사용되기도 하였는데, 이 경우 배경계수의 영향이 단점으로 들 수 있다. 측정을 위하여 ^{252}Cf 중성자원을 파이프의 한쪽에 평행판 이온 챔버와 함께 설치하고 파이프를 통과한 감마선과 중성자의 시간 분포를 파이프의 반대편에 설치한 검출기로 측정하게 된다. 검출기를 파이프의 수직 방향과 수평 방향으로 움직여서 스캔을 한 후, 파이프를 투과한 중성자의 양으로부터 파이프 내부의 축적물의 두께를

추출해내고, 파이프를 투과한 감마선의 양으로부터 축적물의 H/U 비율을 구해내게 된다. 이 측정의 결과는 이후 직접적으로 파이프내의 축적물의 두께와 색깔로 얻은 정보와 잘 일치하였다[9].

3. 결 론

중성자의 초기의 이용은 주로 핵융합로의 건설에 쓰이는 물질의 성질 탐구에 국한되어 있었으나 최근 20년 동안 중성자는 산업 및 의료영상의 여러 방면에서 널리 쓰이게 되었다. 더욱이 가속기를 이용한 새로운 중성자원의 개발과 중성자 산란을 위한 시뮬레이션 코드의 개발은 중성자를 더욱 광범위하게 쓰일 수 있도록 하고 있다. 이처럼 중성자의 쓰임이 확대되어 가는 것과 병행하여 중성자를 보다 효과적으로 측정할 수 있는 검출기의 개발은 더욱 필요하게 되었고 향후 중성자 검출기의 개발은 꾸준히 진행될 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] H. Kolbe, E. Lehmann, W. Gunia, S. K?rner, Nucl. Instr. and Meth. A 424 (1999) 40.
- [2] F. Cipriani, J.-C. Castagna, L. Claustre, C. Wilkinson, M.S. Lehmann, Nucl. Instr. and Meth. A 392 (1997) 471.
- [3] L.C. Johnson, C.W. Barnes, P. Patistoni, C. Fiore, G. Janeschitz, V. Khripunov, A. Krasilnikov, F.B. Marcus, T. Nishitani, G. Sadler, M. Sasao, V. Zaveriaev, Rev. Sci. Instr. 70 (1999) 1145.
- [4] E.A. Sokol, V.I. Smirnov, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, Nucl. Instr. and Meth. A 400 (1997) 96.
- [5] D.J. Loaiza, Nucl. Instr. and Meth. A 422 (1999) 43.
- [6] Bubble Technology Industries, “ <http://www.magmas.ca/~bubble/bubbles1.htm> ”.
- [7] C. Mori, J. Gotoh, A. Uritani, H. Miyahara, Y. Ikeda, Y. Kasugai, J. Kaneko, M. Sasao, Y. Sakuma, K. Kudo, N. Takeda, T. Iida, Nucl. Instr. and Meth. A 422 (1999) 75.
- [8] I. Imaida, Y. Muraki, Y. Matsubara, K. Matsuda, H.

- Tsuchiya, T. Hoshida, T. Sako, T. Koi, P.V. Ramanamurthy, T. Goka, H. Matsumoto, T. Omoto, A. Takase, K. Taguchi, I. Tanaka, M. Nakazawa, M. Fujii, T. Kohno, H. Ikeda, Nucl. Instr. and Meth. A 421 (1999) 99.
- [9] T. Uckan, M.S. Wyatt, J.T. Mihalczo, T.E. Valentine, J.A. Mullens, T.F. Hannon, Nucl. Instr. and Meth. A 422 (1999) 26.

저|자|약|력



성명 : 박세환

◆ 학력

- 1994년 고려대 물리학과 이학사
- 1996년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 2002년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경력

- 2002년 - 2003년 한국원자력연구소 post doc.
- 2003년 - 현재 한국원자력연구소 미래원자력기술 개발단 선임연구원



성명 : 황종선

◆ 학력

- 1977년 한양대 전기공학과 공학사
- 1979년 한양대 대학원 산업공학과 공학석사
- 1995년 전북대 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

- 1987년 - 1998년 한국원자력연구소 책임연구원 전남도립 남도대학 컴퓨터응용 전기과 교수
- 2003년 - 현재 한국전기전자재료학회 기획이사

