

**실리콘 도핑을 위한 하나로 NTD2
조사공에서의 중성자속 측정**

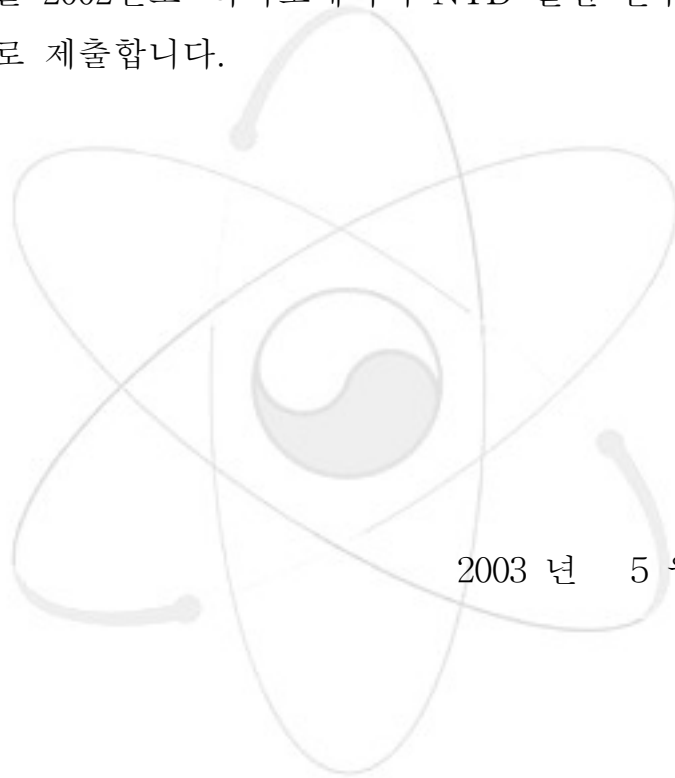
**Measurements of Neutron Flux in NTD2
Irradiation Hole of HANARO for Silicon Doping**

KAERI

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2002년도 “하나로에서의 NTD 실현 연구” 과제의
기술 보고서로 제출합니다.



2003 년 5 월 일

주 저 자 : 김 명 섭
공 저 자 : 박 상 준
 임 경 환
 황 승 렬
 전 병 진

요 약 문

I. 제 목

실리콘 도핑을 위한 하나로 NTD2 조사공에서의 중성자속 분포 측정

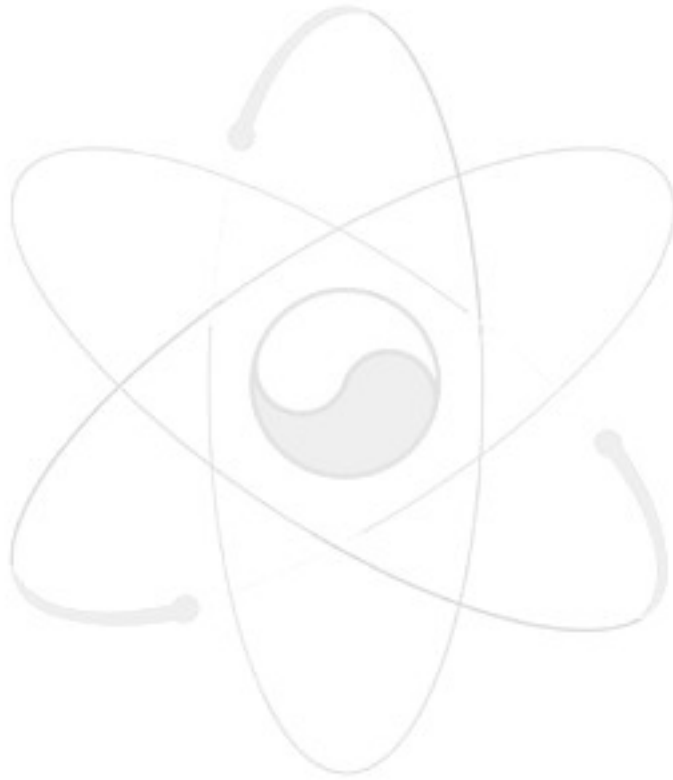
II. 연구의 목적

하나로에서는 중성자속 스크린 방법에 기초한 중성자 변환 도핑 연구를 수행하고 있다. 축 방향으로 균일한 조사를 하기 위한 최적의 중성자속 스크린을 물, 알루미늄, 공기층의 조합을 통해 설계, 제작하였다. 또한 제어 봉 위치에 따른 이 조사통의 최적 조사 위치가 결정되었다. 중성자 조사의 균일성을 확인하기 위해서는 최적 중성자 스크린을 이용하여 제작된 조사통 내에서의 중성자속을 측정해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 NTD2 조사공에 조사 장치 및 Si 단결정이 설치되어 있는 상태에서 중성자속 분포를 측정하여 중성자 조사량의 균일화 정도를 확인하였다.

III. 연구의 내용 및 결과

하나로 NTD2 조사공에서 조사 장치를 설치한 후 중성자속을 측정하였다. 중성자속 모니터로 Au wire를 붙여 NTD2 조사공에서 조사시켰으며, 조사 후 Au wire의 방사능을 감마 scanning 방법으로 측정하여 중성자속 분포를 결정하였다. 측정된 중성자속 분포와 설계에 사용된 MCNP 계산 결과가 잘 일치하였으므로 계산의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 제작된 조사통을 그대로 이용하여 측정한 경우, 중성자속 축방향 분포는 가운데 부분이 낮고 가장자리가 높게 측정되었으며, 위쪽이 아래쪽보다 높았다. 측정값 사이의 차이는 7 %이내였다. 이에 따라 조사 장치의 중성자 스크린에 알루미늄 wire를 감고 측정을 다시 수행하였으며, 중성자 조사량을 \pm

2.5 %이내로 균일화 할 수 있었다. 또한 조사통 내부의 물 층 두께에 따른 조사량 변화 경향을 조사하였으며, 3 mm의 물 층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다. 결론적으로, 현재 제작된 조사장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.



SUMMARY

I. Project Title

Measurements of Neutron Flux Distribution in NTD2 Irradiation Hole of HANARO for Silicon Doping

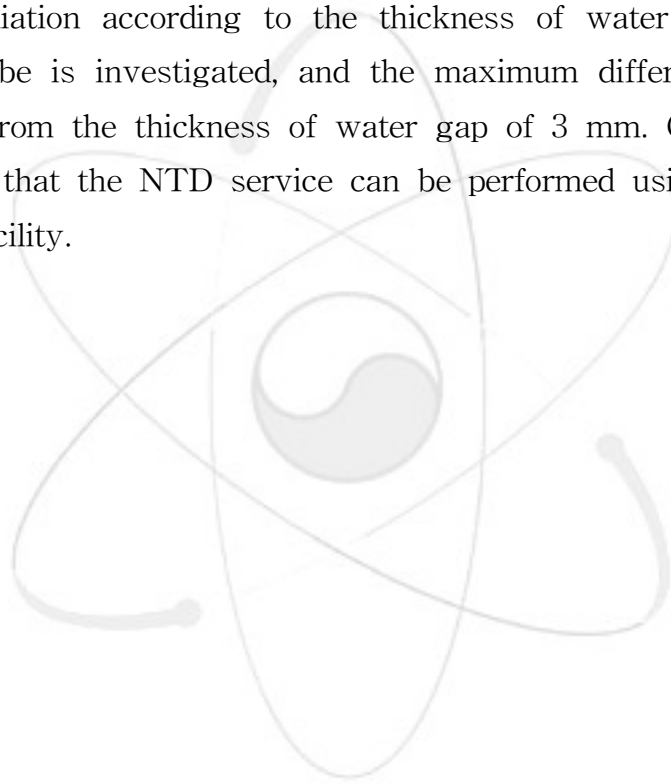
II. Objective of the Project

A research for Neutron Transmutation Doping(NTD) based on a flux screen method is performing in HANARO. The optimum flux screen is searched for longitudinally uniform irradiation by different combination of water, aluminium and void. Its axial position can be adjusted to the optimum location depending on the control rod position. In order to confirm the uniformity of neutron irradiation, neutron flux distribution in the fabricated irradiation tube with the optimum flux screen must be measured and confirmed. Thereupon, in this research, neutron flux distribution is measured in NTD2 irradiation hole with setting of irradiation facility and Si crystals, and the uniformity of neutron irradiation is examined.

III. Contents and Results of the Project

The neutron flux is measured in the HANARO NTD2 irradiation hole after installing the irradiation facility. The Au wires, which are neutron flux monitors, are irradiated in the NTD2 irradiation hole. The radioactivity of irradiated Au wire is measured by gamma scanning method, and the neutron flux distribution is determined. The measured

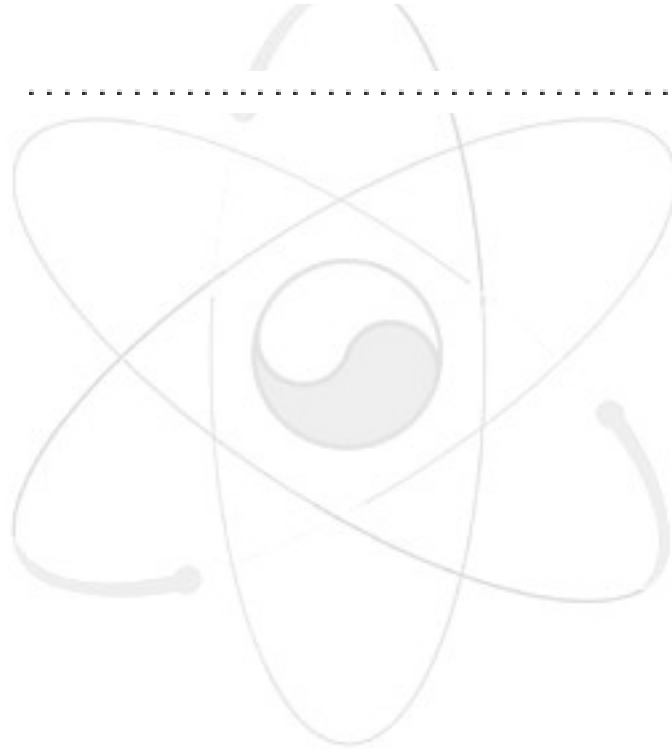
neutron flux distribution is very similar to the result of MCNP calculation used in the design of irradiation facility, so, the reliability of design calculation is verified. In the measurements with the fabricated irradiation tube without any modification, the neutron flux near the center of irradiated area is lower than that of edge, and the flux of upper region is higher than that of lower region. The deviation between the measurements is within 7 %. So, the Al wire is wound round the neutron screen, and the flux is measured again. The neutron irradiation can be flattened within ± 2.5 %. Also, the variation of neutron irradiation according to the thickness of water gap inside of irradiation tube is investigated, and the maximum difference of 5.5 % is occurred from the thickness of water gap of 3 mm. Conclusively, it is confirmed that the NTD service can be performed using the present irradiation facility.



CONTENTS

Statement for Report Submission	i
Summary in Korean	ii
Summary	iv
Contents	vi
Contents in Korean	viii
List of Figure	x
List of Table	xii
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Neutron Flux Measurements for Design of Neutron Screen	4
2.1. Outline	4
2.2. Neutron Flux Measurements by using Mocked Irradiation Facility	7
2.2.1. 1st Experiments	7
2.2.2. Results of 1st Experiments	13
2.2.3. 2nd Experiments	23
2.2.4. Results of 2nd Experiments	24
Chapter 3. Verification Experiments of Designed and Fabricated Neutron Screen	28
3.1. Outline	28
3.1.1. Designed and Fabricated Neutron Screen	28
3.1.2. Si ingot used in Experiments	32

3.2. Neutron Flux Measurements After Installing	
of Neutron Screen	33
3.2.1. 1st Experiments	33
3.2.2. Results of 1st Experiments	34
3.2.3. 2nd Experiments	36
3.2.4. Results of 2nd Experiments	36
3.2.5. 3rd Experiments	38
3.2.6. Results of 3rd Experiments	40
Chapter 4. Conclusion	44
References	45



목 차

제 출 문	i
요 약 문	ii
SUMMARY	iv
CONTENTS	vi
목 차	viii
그 립 목 차	x
표 목 차	xii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 중성자 스크린 설계를 위한 중성자속 측정	4
2.1. 개 요	4
2.2. 모의 조사 장치를 이용한 중성자속 측정	7
2.2.1. 1차 측정 실험	7
2.2.2. 1차 측정 결과	13
2.2.3. 2차 측정 실험	23
2.2.4. 2차 측정 결과	24
제 3 장 설계, 제작된 중성자 스크린 실증 실험	28
3.1. 개 요	28
3.1.1. 설계, 제작된 중성자 스크린	28
3.1.2. 실험에 사용된 Si ingot	32
3.2. 중성자 스크린 설치 후 중성자속 측정	33
3.2.1. 1차 측정 실험	33
3.2.2. 1차 측정 결과	34
3.2.3. 2차 측정 실험	36

3.2.4. 2차 측정 결과	36
3.2.5. 3차 측정 실험	38
3.2.6. 3차 측정 결과	40
제 4 장 결 론	44
참 고 문 헌	45

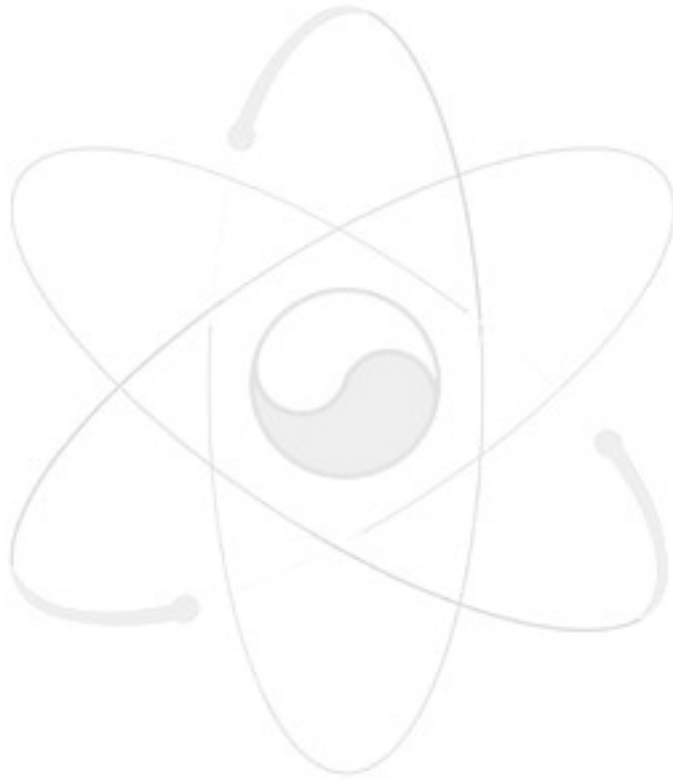


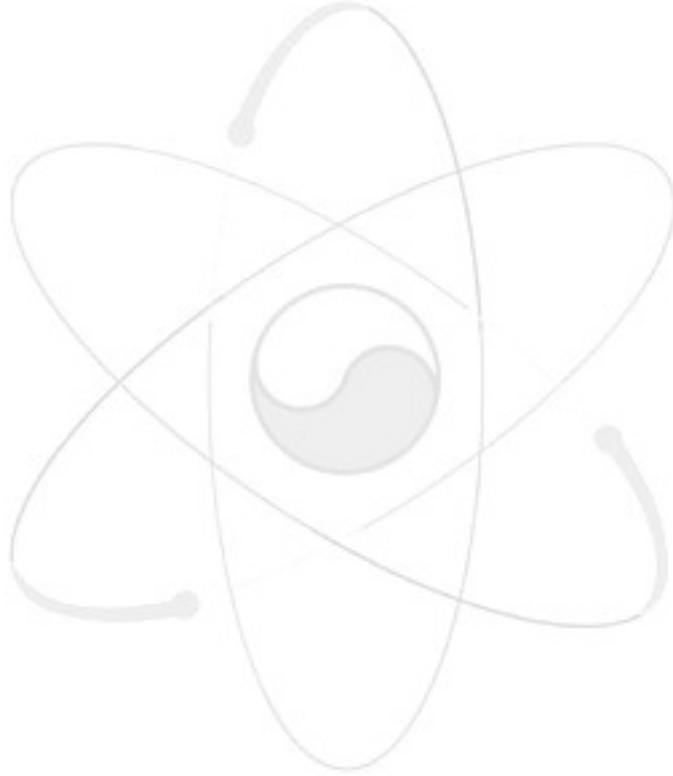
그림 목 차

그림 1-1. Si 반도체 제조 공정	1
그림 2-1. 하나로 노심과 반사체 내부에서 NTD 조사공의 위치	5
그림 2-2. Si과 Al의 흡수 단면적 비교	7
그림 2-3. Si과 Al의 전단면적 비교	8
그림 2-4. 제작된 원통형 Al ingot	8
그림 2-5. Al ingot의 조립 형상 및 중성자속 측정용 wire 설치 모습	9
그림 2-6. Al ingot이 조사통에 조립된 형상(a) 및 조사통이 NTD2 조사공내의 슬리브에 장입된 모습(b)	10
그림 2-7. 조사된 Au wire 감마선 측정을 위한 NaI(Tl) 감마선 계측 계통	11
그림 2-8. 절대 중성자속 결정을 위한 HPGe 감마선 계측 계통	12
그림 2-9. NTD2 조사공에서 측정 및 계산된 축방향 Au 반응율	14
그림 2-10. Cd 비를 구하기 위한 data evaluation	15
그림 2-11. NTD2 조사공에서 측정된 축방향 열중성자 반응율	17
그림 2-12. Al ingot의 상부면에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율	17
그림 2-13. Al ingot의 축방향 중심에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율	18
그림 2-14. Al ingot에 설치한 Au wire의 열중성자 반응율	19
그림 2-15. 측정된 축방향 열중성자 반응율과 계산 결과와의 비교 ...	20
그림 2-16. 30 kW에서 측정된 절대 중성자속의 24 MW 환산값과 계산 결과와의 비교	21
그림 2-17. 열출력과 보상형 이온함 전류와의 상관 관계	22
그림 2-18. 조사통을 가공하기 전 조사통이 슬리브에 장전된 모습(a)과 조사통을 가공한 후 조사통 내부에 Al ingot 및 Au wire가 조립된 모습	24

그림 2-19. 조사통 가공 후 Al ingot의 상부면에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율	26
그림 2-20. 조사통 가공 후 Al ingot의 축방향 중심에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율	26
그림 2-21. 조사통 가공 후 측정된 축방향 열중성자 반응율, azimuthal 방향 각 측정값의 평균 및 MCNP 계산 결과와의 비교	27
그림 2-22. 절대 중성자속 측정값 및 MCNP 계산 결과	27
그림 3-1. 최적 중성자 스크린 모델(가로로 확대)	29
그림 3-2. 최적화된 screen 사용시 Si ingot에서의 상대 중성자속 분포	29
그림 3-3. 설계된 중성자 스크린의 모양과 이에 대응되는 중성자속	31
그림 3-4. 제어봉 위치에 따른 단결정의 최적 위치 변화 경향	31
그림 3-5. 제작된 조사통이 슬리브에 장입된 모습 및 상세 부분	32
그림 3-6. NTD2 조사공에서 조사시킨 Au wire 방사능을 scanning한 결과	34
그림 3-7. 조사통에 1.2 mm Al wire를 감고 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과	37
그림 3-8. 조사통에 1.8 mm Al wire를 감고, 30 cm Si 단결정 2개에 붙여 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과	41
그림 3-9. 세 위치에 붙인 Au wire 측정값을 가중 평균한 결과	42
그림 3-10. 단결정 표면 및 내부 평균 중성자속 분포 비교 계산 결과	43

표 목 차

표 2-1. 각 위치에서 결정된 Cd 비	16
표 2-2. 측정 및 계산 data 최대값 근처에서의 중성자속 평균값	21
표 2-3. 30 kW 및 24 MW에서 측정된 Au 반응율	22
표 3-1. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속	35
표 3-2. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속	38
표 3-3. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속	41



제 1 장 서 론

실리콘(Si)은 컴퓨터나 microprocessor 등에 사용되는 집적 회로에서부터 대규모 고전압 thyristor power diode, transistor 등에 이르기까지 광범위하게 사용되는 소자 물질이다. 그러나 실리콘이 이렇게 사용되기 위해서는 적당한 비저항을 가져야 하며, 이를 위해 인(n-형 실리콘)이나 붕소(p-형 실리콘) 등의 불순물을 도핑하여 반도체적 성질을 갖게 해야 한다.

Si 단결정을 성장시키는 방법에는 그림 1-1에서와 같이 Czochralski법(Cz)과 Floating Zone법(Fz)이 있다[1-1]. Czochralski법은 석영 도가니 속에 녹아 있는 규소에 단결정 씨앗을 넣어 서서히 돌리면서 결정을 뽑아 올리는 것이다(Cz-Si). 이렇게 만든 Cz-Si은 주로 컴퓨터 등에 쓰이는 저전력 소자의 재료로 쓰인다. 이 방법으로 단결정을 만드는 경우에는 녹은 규소가 자연 대류를 하며, 도가니에서 녹아 나오는 불순물과 용존 산소로 인하여 단결정의 순도와 품질이 상대적으로 낮고, 비저항을 수십 Ω -cm 이상으로 높이는 것이 곤란하다. 그러나 현재 Cz-Si는 전체 규소 반도체 시장의 90 % 이상을 차지하고 있다.

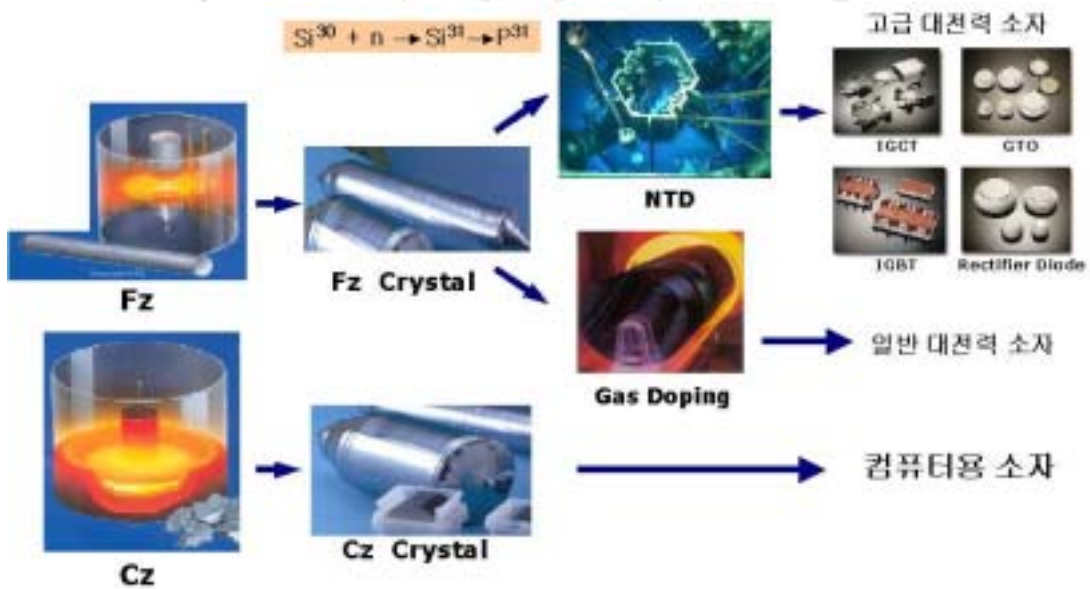
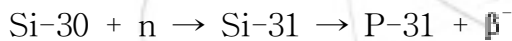


그림 1-1. Si 반도체 제조 공정.

Floating Zone법은 큰 연필 모양의 다결정 규소에 단결정 씨앗을 붙인 뒤 고주파 유도 코일을 이용하여 국부적으로 녹여가며 단결정을 키우는 것이다. 녹은 부분은 모래 시계처럼 잘록하며, 회전에 의한 원심력과 증력으로 녹은 규소가 서서히 사방으로 퍼져가면서 단결정으로 굳는다. 이렇게 만든 것을 Fz-Si라 하며, Cz-Si보다 품질이 좋아서 대전력 소자에 쓰인다. 이 가운데 중성자 변환 도핑(NTD, Neutron Transmutation Doping)을 적용하는 NTD-Si의 비율은 약 20 %이다. NTD를 하지 않는 경우에는 고주파 가열과정에 dopant 가스가 흡입되도록 한다.

가장 일반적으로 사용되는 도핑 방법은 실리콘 단결정을 성장시키기 위해 실리콘을 녹인 상태에서 불순물(dopant)을 첨가하는 방법이다. 그러나 실리콘 내부에서의 불순물의 분산 계수가 작기 때문에 불순물 분포가 불균일해질 가능성이 있다. 따라서 비저항의 공간적 편차가 커지게 되고, 고전압 직류(High Voltage Direct Current, HVDC) 전송을 위한 rectifier와 같은 대규모 소자에 사용될 경우 hot spot의 형성에 의한 breakdown의 가능성이 있다.

NTD는 Si 단결정을 원자로 속에서 중성자에 조사시켜 거의 완벽하게 균일한 불순물 농도 분포를 얻을 수 있는 도핑 방법이다. Si NTD는 아래와 같은 핵변환 반응을 이용하여,



Si 단결정 내부에 불순물인 P-31이 생성되도록 하며, 이에 따라 n-형 Si 반도체가 생성된다. Si-31의 붕괴 반감기는 2.62시간이다. 실리콘 단결정에 대한 중성자 조사 조건이 균일하다면 NTD를 통해 단결정 전체에 걸쳐 비저항 분포가 매우 균일한 고품질 실리콘 반도체를 생산할 수 있다.

이러한 NTD의 개념은 1950년대 초반에 이미 도입되었으며, 1970년대에 대전력 소자에 NTD Fz 실리콘이 사용되기 시작하였고, 현재에는 NTD 실리콘 반도체의 세계 생산 규모가 연간 약 100톤에 이르고 있다.

하나로에는 이러한 NTD를 수행할 수 있는 두 개의 수직 조사공을 보유하고 있으며, 고속 중성자의 비율이 열중성자에 비해 매우 작으므로 고속 중성자에 의한 결정 손상을 최소화시킬 수 있는 좋은 여건을 가지고 있다. 이들 조사공 중 NTD2는 직경이 18 cm로서 5인치 실리콘 조사에

적당하며, 직경이 22 cm인 NTD1의 경우에는 더 큰 직경의 실리콘 단결정 조사도 가능하다.

이에 따라 하나로에서는 먼저 NTD2 조사공에서 NTD 서비스를 수행할 수 있는 장치 및 기술을 개발하였으며, 현재 test run을 수행하고 있다 [1-2,3,4,5,6].

이러한 NTD 기술 개발의 핵심은 높은 중성자속을 유지하면서 중성자 조사량을 균일하게 유지하는 것이다. 하나로에서는 다양한 계산을 통해 이러한 핵심 요건을 충족시킬 수 있는 조사 장치를 설계, 제작하였다. 이러한 계산 및 설계의 신뢰성은 실험을 통해 검증되어야 하는데, 본 기술보고서는 NTD2 조사공의 여러 조건에 대한 절대 중성자속 및 중성자속 분포 측정을 통해 설계 검증을 수행한 결과와 이의 분석 및 보완 과정을 기술하고 있다.



제 2 장 중성자 스크린 설계를 위한 중성자속 측정

2.1. 개 요

중성자 변환 도핑(NTD)에서 Si ingot 전체에 걸친 균일한 열중성자 조사와 목표 조사량에 정확하게 도달하기 위해서는 조사공에서의 중성자속 특히, 열중성자속에 대한 분포와 여러 가지 모델을 통해 설계된 장치의 중성자속 평탄화 정도를 파악할 필요가 있다. Si ingot에 균일하게 중성자를 조사시키기 위한 방법에는 정 위치법, 왕복법, 도치법 등이 사용되고 있다 [2-1,2,3,4].

정 위치법은 가장 많이 사용되는 방법으로 Si-ingot을 한 위치에 고정시키고 조사하는 방법이다. 이 경우 제어봉의 위치에 따른 중성자속의 변화가 적어야 하고 축방향의 중성자속 평탄화를 위해 중성자 스크린을 별도로 설치해야 하며, 반경 방향의 중성자속 균일화를 위해 단결정을 회전시켜야 한다. 왕복법은 Si ingot을 상하로 왕복시킴으로써 균일하게 조사하는 방법이고, 도치법은 축방향 분포가 대칭에 가까운 곳에서 절반을 조사시킨 후에 단결정을 거꾸로 넣어 나머지 절반을 조사시키는 방법이다. 하나로에서는 NTD 조사공 하단 부분에 여유 공간이 없지만 조사공의 직경이 비교적 크기 때문에 충분히 스크린을 설치할 수 있으므로, 조사 방법으로 정 위치법을 채택하였다. 하나로 노심과 반사체 내부에서의 두 NTD 조사공의 위치는 그림 2-1과 같다. NTD1, NTD2 조사공은 지름이 각각 22, 18 cm이며, 감마선 성분은 0.2 W/g, 예상 고속 중성자속은 열중성자의 0.2 %로서 NTD에 매우 적합할 것으로 예상된다.

중성자속을 평탄화하기 위한 중성자 스크린은 일반적으로 stainless steel, titanium, nickel 등의 중성자 흡수체를 사용한다. 그런데, 이런 재료를 사용하면 방사화된 뒤 반감기가 비교적 긴 핵종이 생기므로 최적 조건을 찾는 동안 수정이 불가능하고 모두 폐기물이 된다. 이에 따라 하나로에서는 물 층 두께를 조절하여 중성자 스크린을 만드는 방법을 모색하였다. 하나로 NTD 조사공은 단결정과 단결정을 담은 조사통 사이에 충분한 여유가 있기 때문에 물을 중성자 스크린 물질로 사용하는 것이 가능하다. 물의 두께를 조절하기 위한 재료로는 알루미늄을 사용하였다. 알루미늄 재질

로는 구조적인 강도를 가지면서 방사화된 뒤 긴 반감기의 핵종이 적게 생기도록 하기 위하여 Al-6063을 선택하였다. 이것은 Mg와 Si가 합금 제어 물질로 들어가고 다른 원소는 불순물로만 들어간다. Mg와 Si는 방사화된 뒤 반감기가 짧은 핵종이 생긴다. 이 스크린은 조사관내에 항상 설치되도록 할 수도 있으나 단결정을 담는 통이 스크린 역할을 하도록 하여 원자로 조건이 바뀌면 쉽게 교체할 수 있도록 하였다.

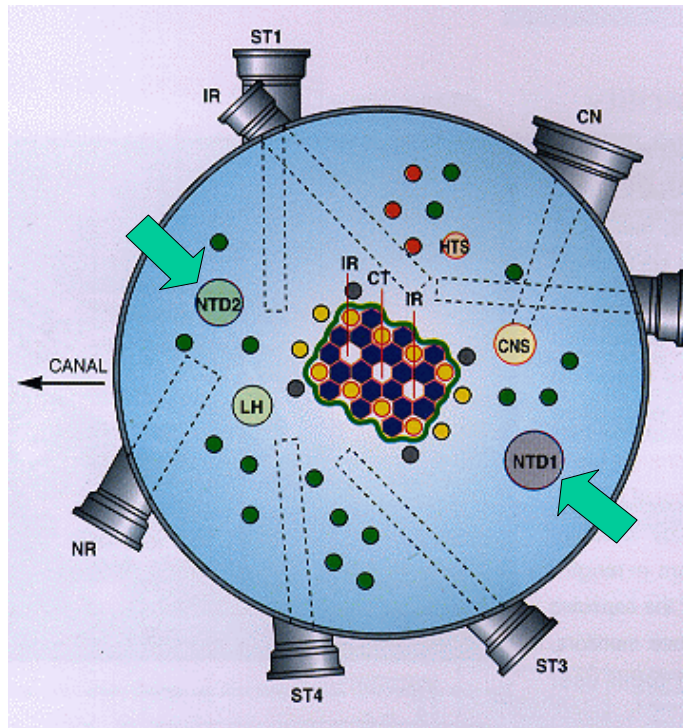
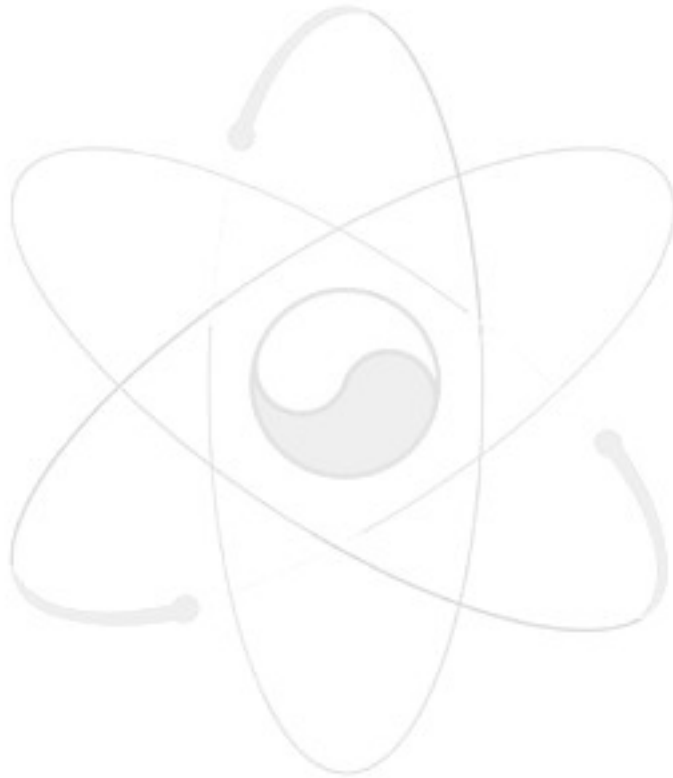


그림 2-1. 하나로 노심과 반사체 내부에서 NTD 조사공의 위치.

이러한 기본 개념을 이용하여 하나로에서는 MCNP 코드를 이용한 계산으로 목표로 하는 조사 장치의 균일도, 실제 제작시의 공차 등과 계산의 통계 오차를 고려하여 최대 $\pm 2.5\%$ 이내의 조사량 균일도를 유지할 수 있는 스크린 설계를 수행하였다.

계산에 사용한 MCNP는 하나로 시운전 시험 자료와의 비교를 통하여 정확도가 입증된 것이다. 그러나 연소 노심을 계산할 수 없기 때문에 새 연료로 장전된 노심 조건에 대하여 계산을 수행하였다. 전통적인 균정수 생산과 노심 확산 계산으로 연소 효과를 고려할 수 있으나, NTD 장치에

서의 복잡한 기하학적 조건을 모사할 수 없다. 이런 이유 때문에 MCNP로 예측하는 중성자속 분포가 실제와 얼마나 일치하는 지를 실험으로 검증하여야 한다. 이에 따라 NTD2 조사공에서 Si 대신 Al 잉곳을 설치한 후 중성자속을 측정하여 MCNP로 예측하는 중성자속과 비교하였다.



2.2. 모의 조사 장치를 이용한 중성자속 측정

2.2.1. 1차 측정 실험

NTD2 조사공에서 NTD를 수행하기 위해서 Al을 기본 재료로 슬리브와 조사통을 제작하였다. 슬리브는 NTD2 조사공에 항상 설치되어 있는 부분이며, 조사통은 Si 단결정을 장전하여 조사공에 설치된 슬리브로 삽입된다. 따라서 이러한 슬리브가 NTD2 조사공에 설치되어 있을 때 조사통 내부에 Si ingot을 넣어서 중성자속 분포를 측정하면 조사공 내부의 중성자속을 정확하게 알 수 있다. 그러나 Si ingot은 가공성이 좋지 않을 뿐만 아니라 가격 또한 비싸다. 따라서 Si와 핵적 특성이 유사한 Al을 조사 물질로 사용하여 중성자속 분포 측정을 위한 모의 조사 실험을 수행하였다. Si과 Al의 흡수 단면적 및 전단면적을 비교한 그림은 그림 2-2, 2-3과 같다[2-5].

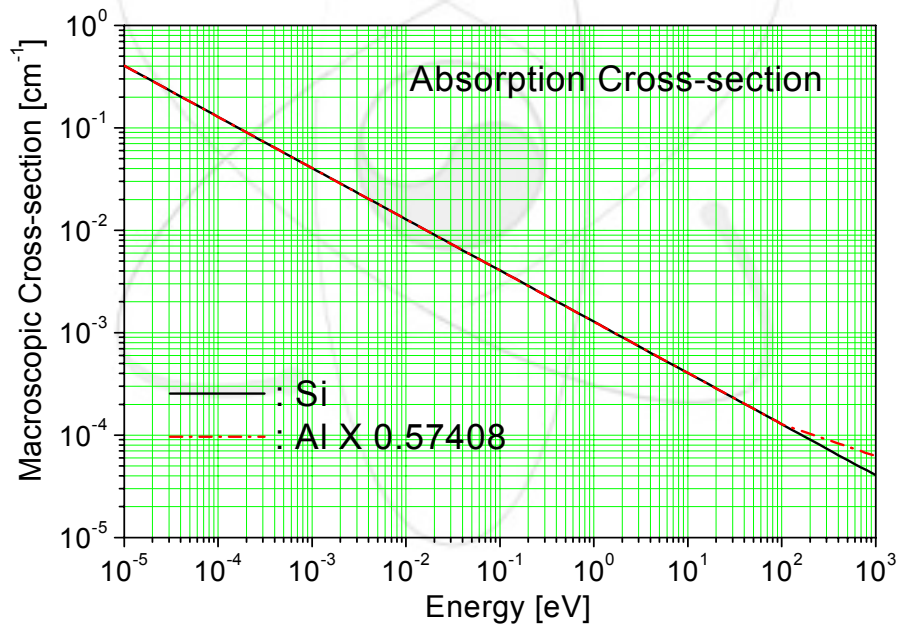


그림 2-2. Si과 Al의 흡수 단면적 비교.

제작된 Al ingot은 그림 2-4와 같이 직경 102 mm, 높이 200 mm의 원통형 5개이며, 윗면 및 밑면에는 각 ingot의 결합 시 지그 역할을 하기 위한 요철이 있고 가운데에는 직경 10 mm의 구멍이 있어 중성자속을 측정하기 위한 wire를 설치할 수 있다. 또한 윗면에는 반경 25 mm 위치에 흡

이 있고, 옆면에는 상하방향 중심에 역시 홈이 있어 중성자속 측정용 wire를 설치할 수 있게 하였다.

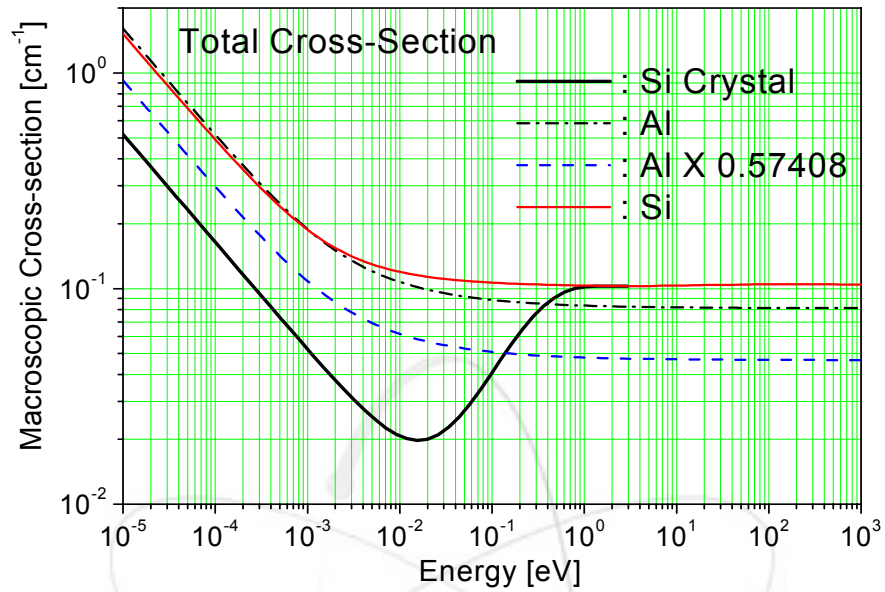


그림 2-3. Si과 Al의 전단면적 비교.



그림 2-4. 제작된 원통형 Al ingot.

이러한 Al ingot 5개는 그림 2-5와 같이 조립되며, 가운데에는 그림에서와 같이 중성자속 측정용 wire를 설치한다. wire에는 20 cm 위치마다 외경이 0.09 인치, 내경이 0.05 인치인 Cd tube를 10 mm 길이로 잘라서 wire를 끼워 넣어 Cd 비도 측정하였다. 따라서 Cd 비 측정 위치는 -20, 0, 20, 40이 된다. 측정 위치는 노심 상하방향 중심을 0으로 하여 기준으로 하였다.

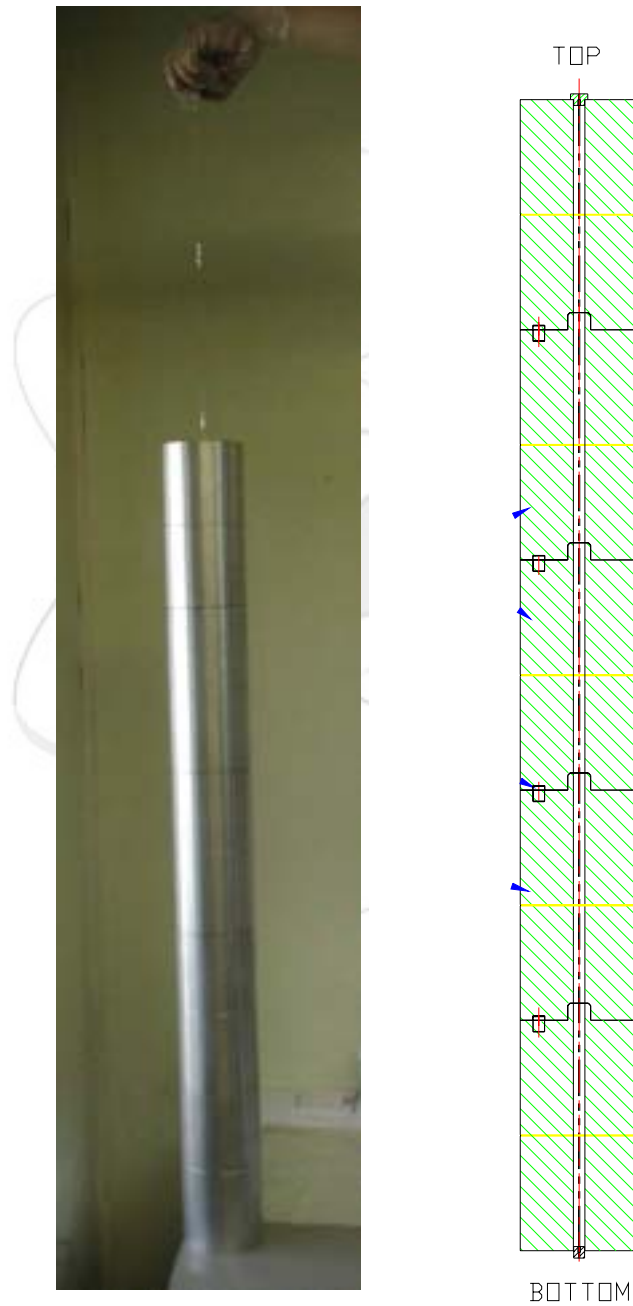


그림 2-5. Al ingot의 조립 형상 및 중성자속 측정용 wire 설치 모습.

Al ingot 5개가 조사통에 조립된 형상은 그림 2-6(a)와 같으며, 이렇게 조립된 조사통을 NTD2 조사공에 장입된 슬리브에 그림 2-6(b)와 같이 설치하여 조사 실험을 수행하였다.

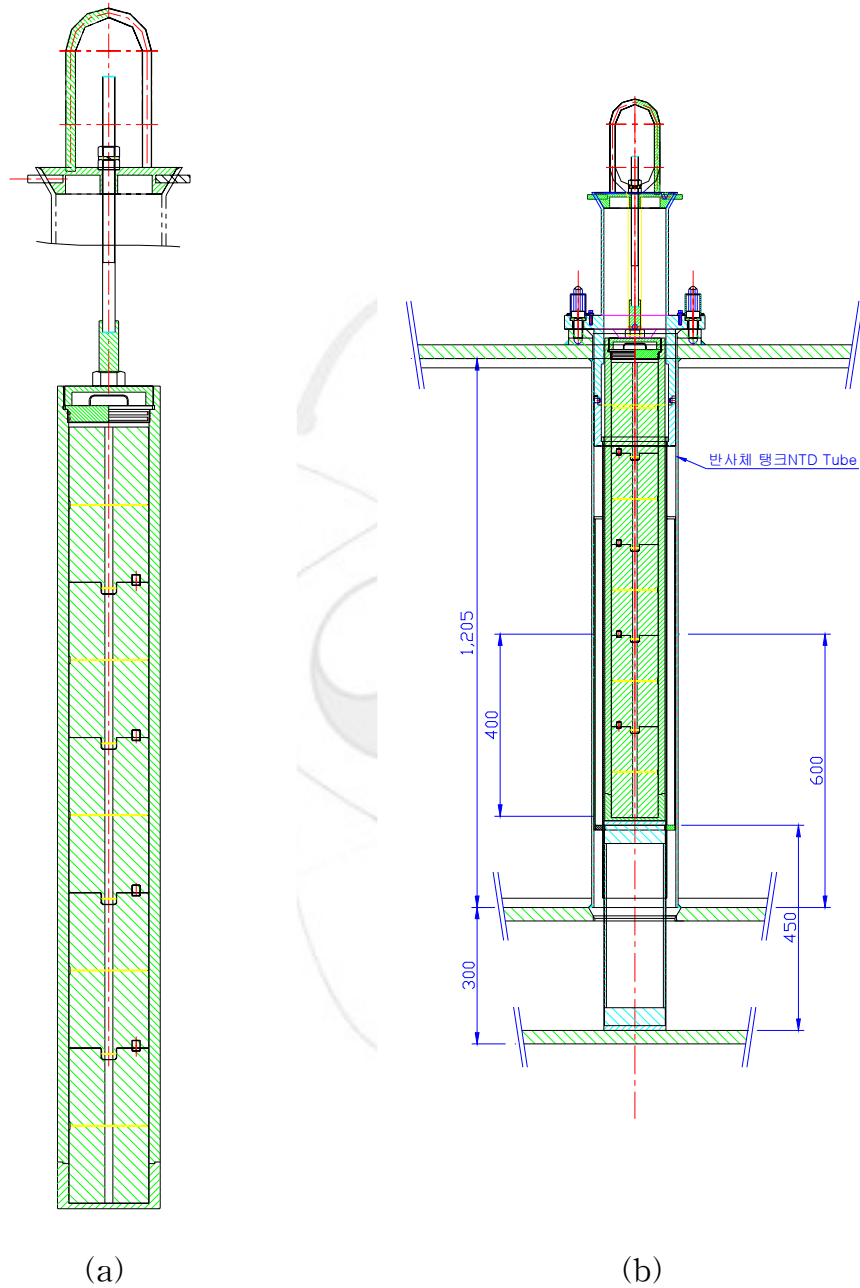


그림. 2-6. Al ingot이 조사통에 조립된 형상(a) 및 조사통이 NTD2 조사공내의 슬리브에 장입된 모습(b).

중성자속 측정을 위해 사용된 방사화 시료로는 방사화 단면적과 방사선량, 측정 및 설치 용이성 등을 고려하여 Au wire를 사용하였으며, Au wire의 직경은 0.1 mm이다. 원자로 출력은 30 kW, 조사 시간은 1시간이었다. 조사는 2001년 6월 5일 수행하였으며, 30 kW 임계시 제어봉 위치는 396.2였다. 조사 후 약 5시간 후에 수조 밖으로 인출을 시도하였으나 방사선량이 과도하여(약 1000 mrem/hr), 2일 동안 냉각시킨 후 수조 밖으로 인출, 트리거 핵연료 캐스크에 보관하였다. 2일 냉각 후 방사선량은 100 mrem/hr정도였다.

조사된 Au wire는 NaI(Tl) 감마선 계측 계통을 이용하여 감마 스캐닝하였다. 스캐닝시 납 슬릿 폭은 4 mm였으며, Au wire의 측정 간격은 10 mm였고, 선원과 계측기 표면까지의 거리는 55 mm였다. 감마선 계측 계통은 아래 그림과 같다.

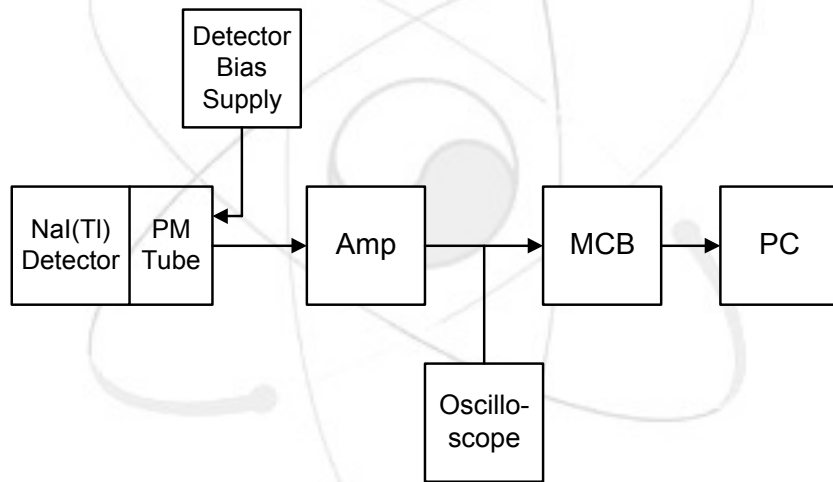


그림. 2-7. 조사된 Au wire 감마선 측정을 위한 NaI(Tl) 감마선 계측 계통.

NaI(Tl) 섬광 계측기 인가 전압은 +750 V였으며, MCA 방식으로 감마선 스펙트럼을 측정하여 Au-198 411 keV 감마선 피크의 면적을 구한 후 냉각 시간을 고려하여 Au의 반응율을 계산하였다.

스캐닝이 끝난 Au wire는 적당한 길이로 잘라 HPGe 계측 계통을 이용하여 절대 방사능 측정을 수행한 후 절대 중성자속을 결정하였다. HPGe

감마선 계측 계통은 그림 2-8과 같다.

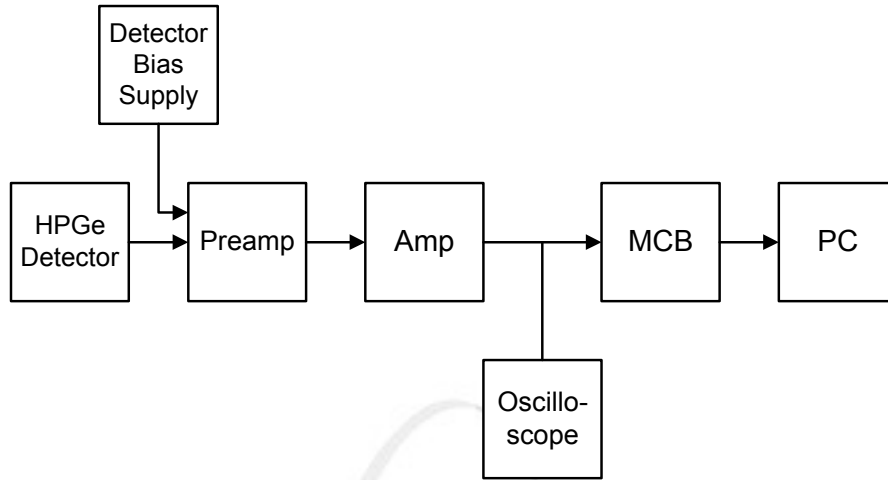


그림 2-8. 절대 중성자속 결정을 위한 HPGe 감마선 계측 계통.

HPGe 계측기 인가 전압은 +2600 V였으며, MCA 방식으로 감마선 스펙트럼을 측정하여 Au-198 411 keV 감마선 피크의 면적을 구한 후 아래 식을 이용하여 열중성자속을 구하였다.

원자로에서 t_r 시간 동안 중성자를 조사시킨 시료를 $t=t_r$ 에 꺼내어 $t=t_r+t_{m1}$ 에 측정을 시작한 후 $t=t_r+t_{m2}$ 에 측정을 종료하였다면 포화 방사능 A_∞ 는

$$A_\infty = \frac{4\pi}{p\epsilon\Omega(1-a)} \frac{\lambda G}{(1-e^{-\lambda t_r})(e^{-\lambda t_{m1}} - e^{-\lambda t_{m2}})} \quad (2-1)$$

가 된다. 여기서,

- G : 스펙트럼상의 피크 면적,
- p : 각 감마선에 대한 붕괴당 방출 확률(emission probability),
- λ : 붕괴 상수(decay constant),
- ϵ : 고유 효율(intrinsic efficiency),
- Ω : 입체각 (solid angle-steradian),
- a : $\frac{T-L}{T}$ (T: true time , L: live time)

이며, 실제 방사능 측정시에는 고유 효율과 입체각을 고려한 절대 효율을 사용한다. 열중성자속은

$$\phi_{th} = \left(1 - \frac{1}{R_{Cd}}\right) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{A}{bwN_a g_w \sigma_{th}} A_{\infty} \quad (2-2)$$

와 같다. 위에서,

g_w : Westcott g-factor,

σ_{th} : kT에서의 중성자 흡수 단면적,

R_{Cd} : Cadmium ratio,

ϕ_{th} : 열중성자속이 Maxwell 분포를 따를 때 규격화된 Maxwell 분포식 앞의 계수항(적분중성자속),

b : abundance,

w : 시료의 질량(g),

N_a : 아보가드로수,

A : 시료의 원자량,

을 각각 나타낸다.

열의 중성자 반응 중 공명 흡수에 의한 방사화 단면적은 Breit-Wigner 식으로 계산이 가능한데 금(Au)의 경우에는 5 eV 근처에 있는 주 공명 피크의 면적이 매우 커서 나머지 공명 피크의 영향을 무시할 수 있다. 금 박막의 경우 방사화 단면적 가운데 공명 흡수 성분은 1513 barn, 1/v 성분은 45 barn으로서 공명 흡수 성분이 매우 크다[2-6].

일반적으로 중성자속 측정에 가장 많이 사용하는 Au의 경우에는 방사화 후 생성된 Au-198에서 방출되는 감마선 스펙트럼이 411 keV 단일 피크의 형태를 나타내고, 방사화 분석의 경험 및 기술이 충분히 축적되어 있다.

2.2.2. 1차 측정 결과

NTD2 조사공에서 조사된 Au wire를 감마 스캐닝하여 구한 Au 반응율과 MCNP로 계산된 총 반응율 및 이의 다항식 fitting 곡선은 그림 2-9와 같다. 그림의 0 위치는 원자로 노심의 상하방향 중심을 나타낸다. 각 측정값은 MCNP 계산 결과와의 비교를 위해 고속 중성자 성분을 제거하지 않

은 상태로 나타냈으며, Cd 비를 이용하여 고속 중성자 성분을 제거한 Au 반응율의 최대값으로 규격화하였기 때문에 그림에 나타난 최대값은 1보다 약간 크다. MCNP로 계산한 총 반응율은 통계적 산포가 매우 큰데, 이것은 열외 중성자 영역에 있는 Au의 큰 공명 흡수 피크의 영향이다. 즉, 이 공명 흡수 피크가 있는 에너지 영역은 전체 에너지 영역에 비해 매우 작으므로 MCNP 몬테카를로 계산 시 이 에너지 영역으로는 상대적으로 작은 수의 중성자가 발생한다. 그러나 이 영역에서는 중성자 흡수 단면적이 매우 크므로 이 영역을 경험한 중성자와 그렇지 않은 중성자 사이의 중성자 반응의 통계적 요동이 커진다.

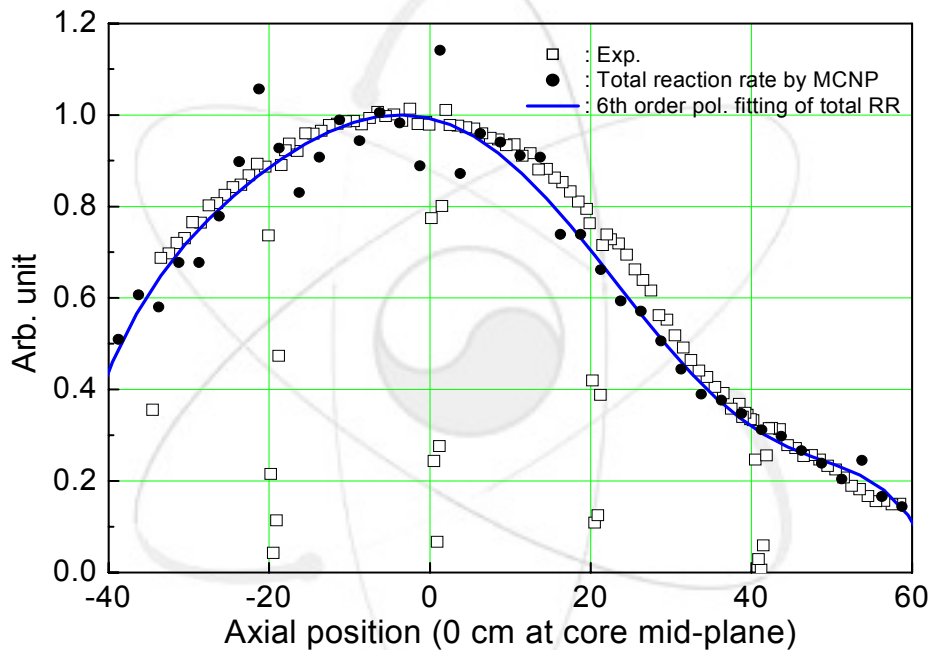


그림 2-9. NTD2 조사공에서 측정 및 계산된 축방향 Au 반응율.

그림 2-9에서 측정값 가운데 -20, 0, 20, 40 cm 부근에서 측정값이 아래로 내려가는 것은 Cd 비의 측정을 위해 설치한 Cd tube 때문이다. 그림 2-10은 Cd 비를 구하기 위해 조사된 Au wire 가운데 Cd를 씌우고 조사시킨 부분의 측정값을 자세히 나타낸 그림이다. 중성자속 측정용 Au wire에 설치한 Cd tube의 길이가 10 mm이므로 Cd tube 부근에서는 Au wire의 감마선 측정 간격을 5 mm로 하여 측정을 수행하였다. 그러나 그림 2-10의 원 측정 data에서 알 수 있는 바와 같이 Cd 비를 계산하기에 충분

한 data를 얻을 수 없었다. 이에 따라 감마선 측정을 1 mm 간격으로 다시 시행하였다. 그림 2-10에서 '□'는 원래의 측정값이고 '●'는 1 mm 간격으로 측정한 측정값이다. 새로운 측정값은 아래 세 점(타원 안에 있는 data)이 유사하게 나타났는데 이 세 data의 평균값을 구하여 Cd를 썬었을 때의 측정값으로 상정하였다. Cd를 설치하지 않았을 때의 측정값을 구하기 위해서는 원 data('□')의 Cd 설치 구간을 제외한 6개의 측정값을 그림에서와 같이 직선으로 fitting하였다. 또한 그림에서 타원내의 세 점 가운데 중앙점에 대응되는 축방향 위치에서의 fitting 직선상의 반응율을 구하였으며 위에서 구한 Cd를 썬었을 때의 측정값과 fitting 직선 상의 반응율 비로 Cd 비를 결정하였다.

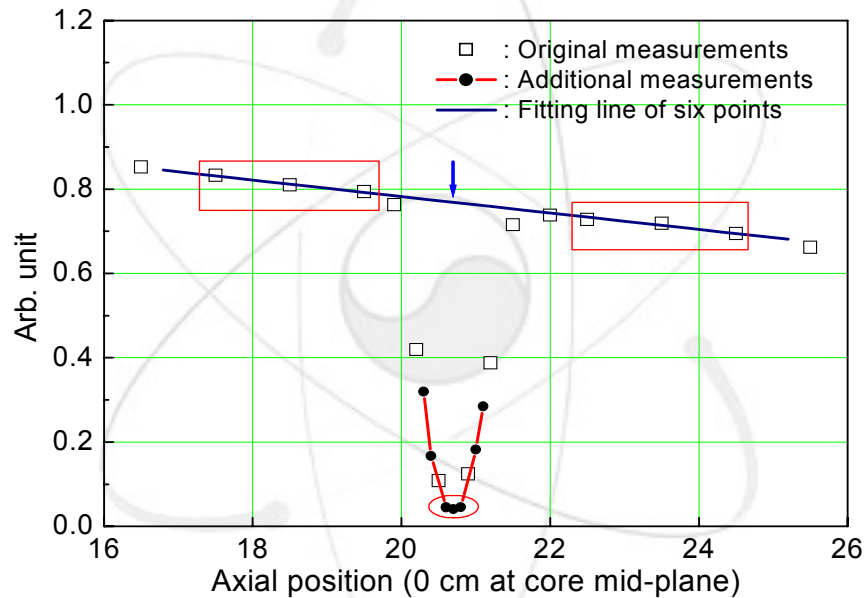


그림 2-10. Cd 비를 구하기 위한 data evaluation.

이렇게 결정된 Cd 비는 모두 4개이지만 40 cm 위치에서는 Cd tube를 설치하고 측정된 Au 감마선 스펙트럼상의 Au 피크 면적이 background에 비해 매우 작아서 신뢰할 만한 자료를 얻을 수 없었다. 따라서 40 cm 위치에서의 측정값을 제외하고 각 위치에서 결정된 Cd 비는 아래 표와 같다.

표 2-1. 각 위치에서 결정된 Cd 비.

측방향 위치	Cd 비
-19.4	21.20
0.9	16.33
20.7	17.33

표에서 알 수 있는 바와 같이 Cd 비는 노심 상하방향 중심 부근에서 낮고, 가장자리로 갈수록 커진다. 또한 노심의 아래쪽이 윗 부분보다 Cd 비가 더 큰데 이는 위쪽에서는 제어봉에 의해 열중성자가 흡수되기 때문이며, 이러한 분포는 계산으로 예측한 것과 유사하다. 따라서 이렇게 구한 Cd 비를 2차식으로 fitting하여 전체적인 Cd 비 분포는 근사하였으며, 이를 이용해 Au의 전체 반응율에서 열중성자 이외의 반응율을 제거하였다. 그림 2-11은 이렇게 구한 열중성자 반응율 가운데 실제 NTD 조사가 이루어지는 영역인 -35~25 cm 영역의 측정값과 그 측정값을 2차식으로 fitting한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이러한 측정 영역에서 열중성자 반응율은 좌우대칭인 2차 곡선 형태와 잘 일치한다.

그림 2-12 및 2-13은 각 Al ingot의 상부면과 측방향 중심에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율을 측정한 결과이다. 각 측정값은 그림 2-9에 나타난 측방향 측정값에서와 동일한 값으로 규격화하였다. 측정값은 Al ingot에 원형으로 설치한 Al wire의 반응율을 임의의 지점으로부터 측정한 결과이므로 노심에 가까운 부분은 반응율이 크고 노심에서 먼 부분은 반응율이 작다. 즉, 각 측정값의 최소값 부근이 노심에서 가장 멀리 떨어진 지점이 될 것이다. 또한 측방향 위치(z)에 따라 측방향 중심(노심 상하방향 중심)에서의 측정값이 크고 중심에서 멀어짐에 따라 측정값이 작아진다.

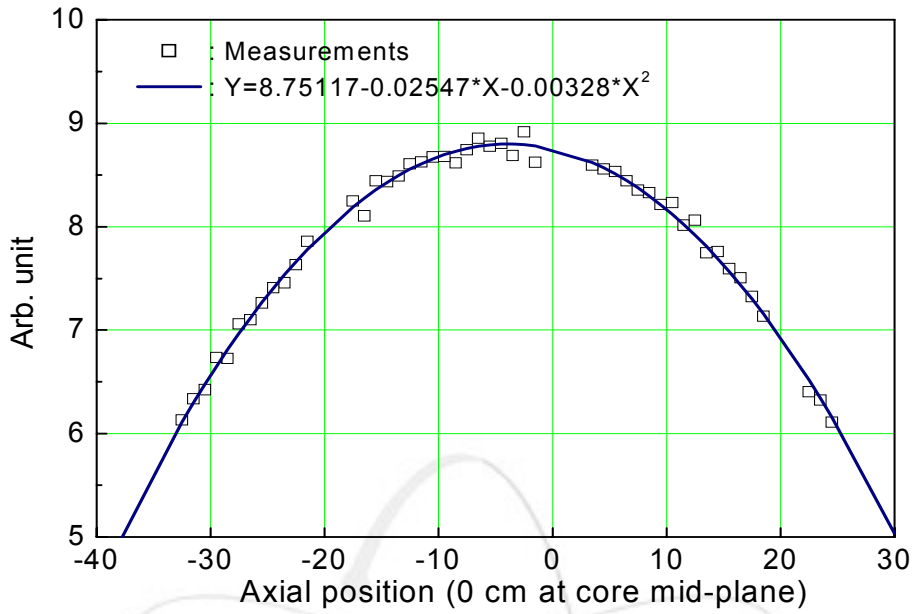


그림 2-11. NTD2 조사공에서 측정된 축방향 열중성자 반응율.

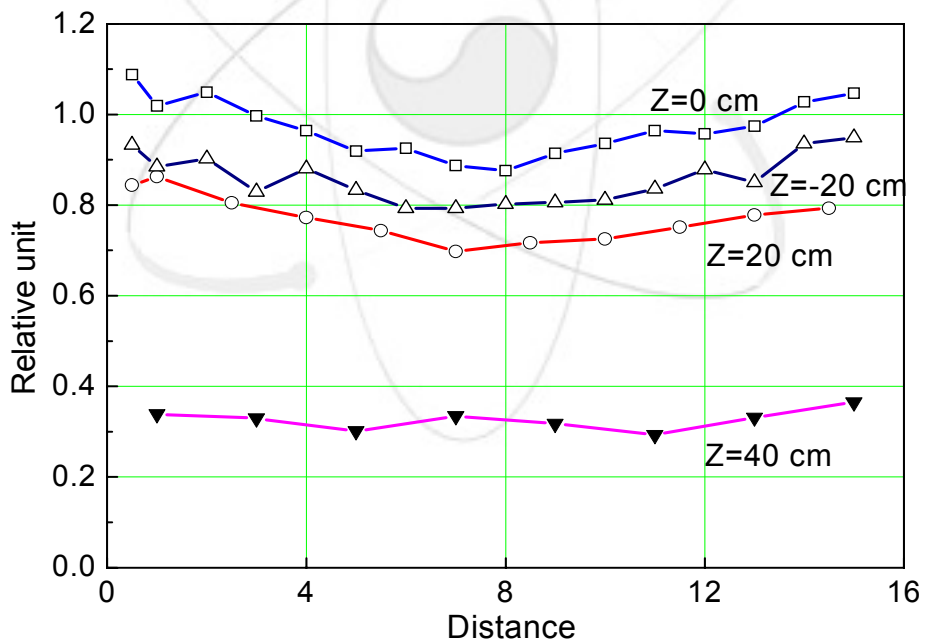


그림 2-12. Al ingot의 상부면에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율

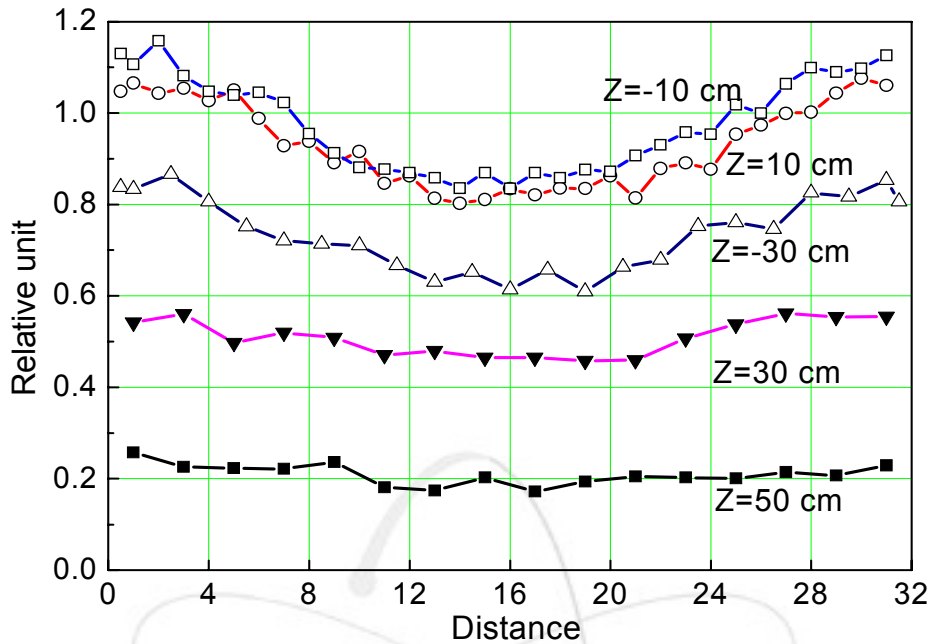


그림 2-13. Al ingot의 축방향 중심에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율.

그림 2-12는 각 ingot 상부면에 있는 반경 25 mm 위치의 홈에 설치한 Au wire에 대한 측정값이고 그림 2-13은 반경 50 mm 위치의 홈에 설치한 Au wire에 대한 측정값이다. 따라서 반경 50 mm에서의 측정값에서 최대값과 최소값의 편차는 약 30 %로서 반경 25 mm 위치의 홈에 설치한 측정값에서 최대값 최소값 사이의 편차 20 % 정도 보다 편차가 크다.

그림 2-14는 그림 2-12, 13에 나타난 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율 측정값의 단순 평균과 축방향 측정값을 함께 나타낸 그림이다. 그림으로부터 azimuthal 방향으로 측정된 측정값의 평균값들은 축방향 측정값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 그림 2-12, 2-13에 나타난 측정값 편차들은 ingot을 회전시키면서 조사가 이루어진다면 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 2-14에서 축방향 측정값은 ingot 반지름이 r일 때, r=0에서의 측정값이고, 그림 2-12는 r=25 mm, 그림 2-13은 r=50 mm에서의 측정값인데 각 측정값의 평균이 그림 2-14에서와 같이 매우 유사하므로, Al ingot의 경우 Al의 중성자 흡수에 의한 중성자속 감쇄는 무시할 수 있는 수준으로

판단된다. Si의 경우에는 6" 단결정의 경우 MCNP 계산으로 중심과 가장 자리의 중성자속 차이가 약 3.5 %로 확인되었으며, 문헌에 따라 3.9 %로 보고된 경우도 있는데[2-7], 위에서와 같이 Si보다 흡수 단면적이 약간 큰 Al ingot의 실험 결과에서는 이 차이가 나타나지 않았다.

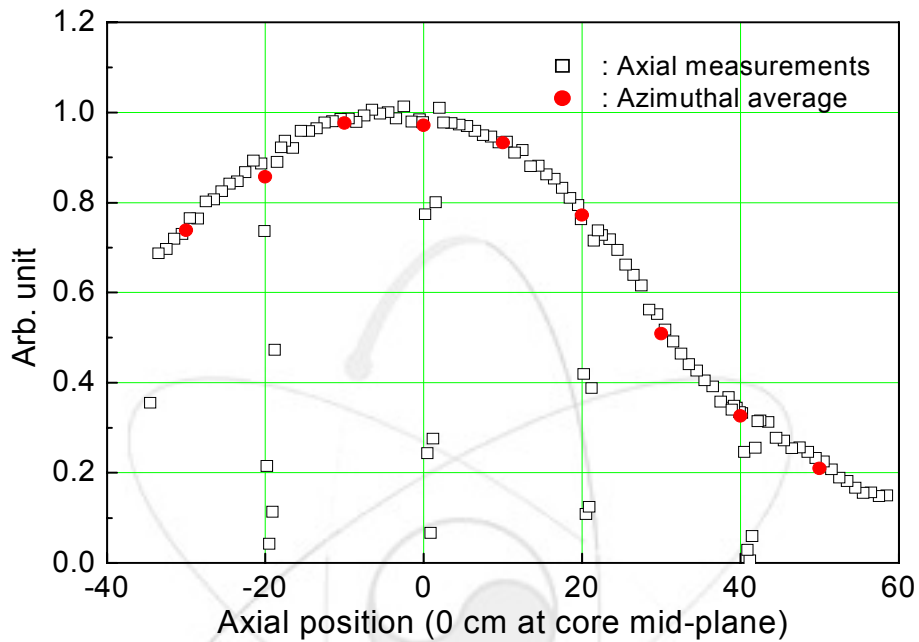


그림 2-14. Al ingot에 설치한 Au wire의 열중성자 반응율.

그림 2-15는 측정된 축방향 열중성자 반응율을 계산 결과와 비교한 그림이다. 각 data는 최대값으로 규격화하였다. 계산은 MCNP와 HANAFMS로 수행하였는데[2-8,9], MCNP는 열중성자 반응율을 output으로 제공하며, 이를 MCNP로 계산한 축방향 중성자 포획 단면적으로 나누어 열중성자속을 구할 수 있다. HANAFMS는 열중성자속을 제공한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 열중성자속 분포와 열중성자 반응율 분포는 매우 유사하다. 따라서 측정된 열중성자 반응율 분포도 열중성자속 분포와 마찬가지로 생각할 수 있다. 그림에서 30 cm 이상의 축방향 위치에서 측정 결과와 계산값의 차이가 크게 나타나는 것은 Cd 비 측정 결과의 오차 때문이라고 생각된다. Cd 비는 축방향 중심 부분에서 작고 중심에서 멀어질수록 증가한다. 측정된 Cd 비 중 40 cm 위치에서의 측정값은 측정값의 신뢰도가 낮아 Cd 비 fitting에서 제외하였다. 30 cm 이상에서는 Cd

비가 크게 증가할 것으로 예상되는데, 다른 위치(-20, 0, 20 cm)에서의 낮은 측정값을 fitting하여 전구간에 적용시켰으므로 30 cm 이상에서는 열중성자 이외의 반응율이 과도하게 제거되어 측정값이 낮아진 것으로 생각된다.

HANAFMS는 측정값 및 MCNP 결과보다 큰 결과를 나타내는데 이는 AI 캔으로 둘러싸인 두꺼운 물 층에서 확산 이론 적용의 고유한 한계 때문이라고 생각된다. 그러나 그림으로부터 Si의 조사가 이루어지는 영역에서 MCNP 계산 결과가 상당히 정확하게 중성자속을 예측하였으므로 연료 연소 효과는 매우 작음을 확인할 수 있다.

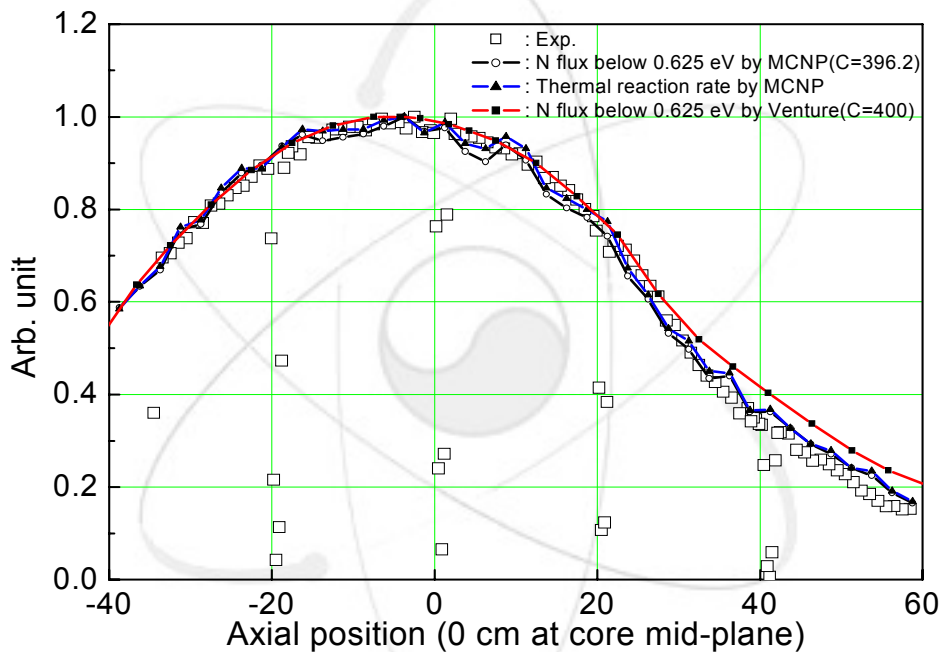


그림 2-15. 측정된 축방향 열중성자 반응율과 계산 결과와의 비교.

그림 2-16은 HPGe 계측 계통을 이용하여 Au wire의 방사능을 절대 측정하여 구한 NTD2 조사공에서의 30 kW 절대 중성자속을 24 MW로 환산하여 나타낸 결과이다. 그림에서 MCNP 및 HANAFMS의 계산 결과도 함께 나타내었다. 표 2-2는 측정 및 계산 data의 최대값 근처에서의 중성자속 평균값이다.

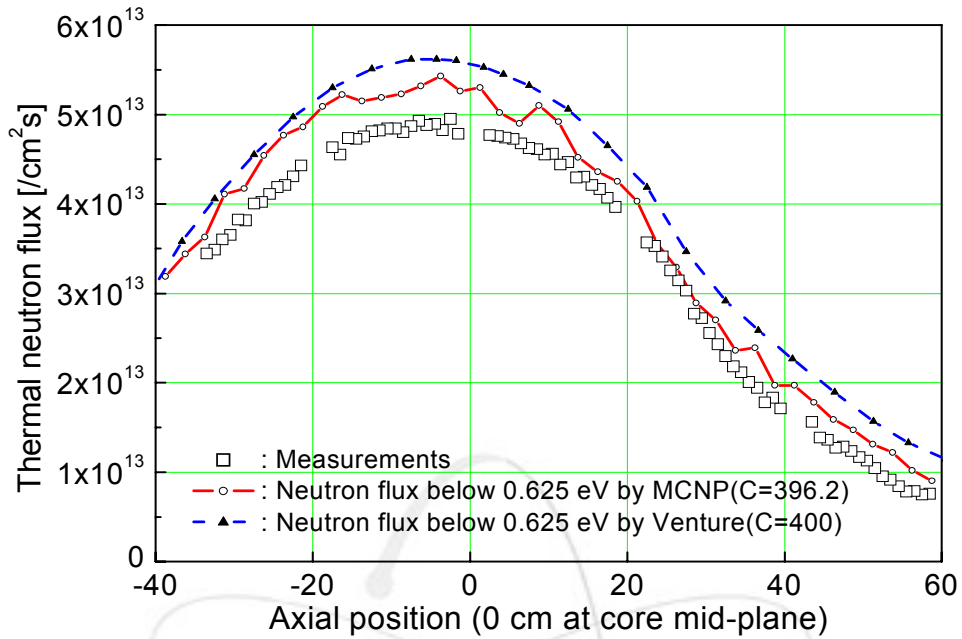


그림 2-16. 30 kW에서 측정된 절대 중성자속의 24 MW 환산값과 계산 결과와의 비교.

표 2-2. 측정 및 계산 data 최대값 근처에서의 중성자속 평균값.

	측정값 [$\times 10^{13}$ n/cm ² sec]		계산값 [$\times 10^{13}$ n/cm ² sec]	
	30 kW	24 MW	MCNP	HANAFMS
값	6.12×10^{-3}	4.90	5.34	5.61
비율	.	1.00	1.091	1.146

윗 그림과 표에서 알 수 있는 바와 같이 절대 중성자속 측정값은 MCNP 계산 결과에 비해서는 9.1 %, HANAFMS 계산 결과에 비해서는 14.6 % 낮게 나타났다. 이러한 차이의 원인으로서는 출력의 선형성이 의심되었다. 이에 따라 방사화분석과제에 의뢰하여 방사화분석과제에서 사용하는 조사공에서 Au wire를 30 kW와 24 MW에서 조사시킨 후, 방사화분석과제의 계측 계통을 이용하여 Au 반응율을 측정하였으며, 아래 표 2-3은

그 결과이다.

표 2-3. 30 kW 및 24 MW에서 측정된 Au 반응율.

원자로 출력	시료 무게	조사 시간	reaction rate (/nuclide)	비율
30 kW(1)	1.335 mg	30 min	4.08×10^{-12}	1
24 MW(800)	0.676 mg	10 min	2.80×10^{-9}	686

윗 표에서 알 수 있는 바와 같이 30 kW와 24 MW에서의 측정된 Au 반응율 사이의 비율은 686으로서 출력 사이의 비 800보다 오히려 14.2 % 작게 나타났다. 이러한 실험외에 원자로 출력의 선형성을 확인할 수 있는 방법은 원자로 열출력과 보상형 이온함(Compensated Ion Chamber, CIC) 전류와의 상관 관계를 확인하는 것이므로 출력에 따른 CIC 전류를 측정하였으며, 그림 2-17과 같다.

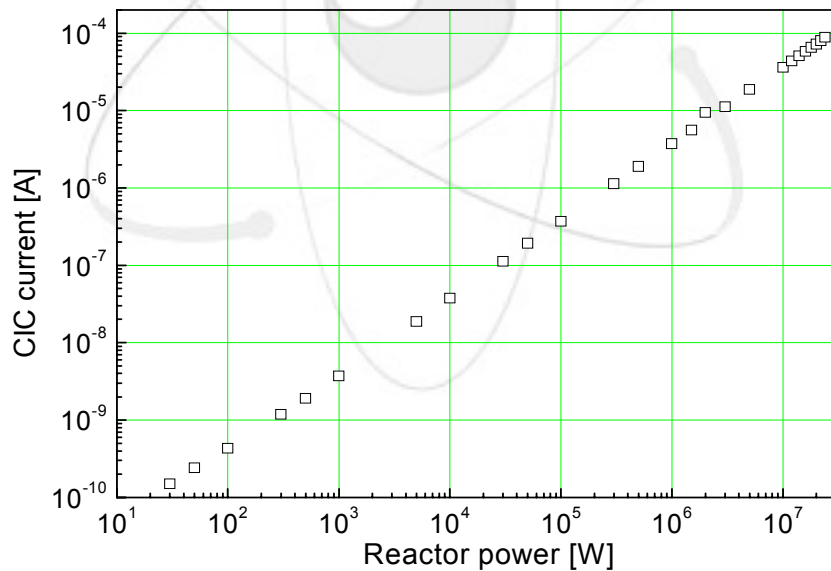


그림 2-17. 열출력과 보상형 이온함 전류와의 상관 관계.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 원자로 열출력과 CIC 전류사이에는 선형성이 잘 유지되는 것으로 확인되었다. 원자로 출력 30 kW에서 CIC 전

류는 1.13×10^{-7} A였으며, 24 MW에서 8.84×10^{-5} A였다. 즉, CIC 전류값 사이의 비는 782로서 열출력 사이의 비 800보다 약 2.2 % 작았으며, 이러한 차이는 측정 오차 범위내로 볼 수 있다. 위와 같은 출력의 선형성으로는 오히려 NTD2 조사공에서 측정된 30 kW에서의 중성자속 측정값이 과대 평가되어 있다고 볼 수 있으므로 이를 고려하면 그림 2-16에서 각 계산 결과와의 차이는 더욱 커진다. 이러한 차이의 발생 원인은 아직 정확하게 규명되지 않았다. 중수 반사체에서의 미량 경수 효과, 핵연료 연소 효과 반영상의 오차 등이 복합적으로 작용하는 것으로 추정된다.

2.2.3. 2차 측정 실험

1차 실험을 통해 MCNP 계산 결과가 측정치와 잘 일치함이 확인되었으므로 조사통을 가공하여 물 층의 두께를 변화시킴으로써 중성자속을 평탄화시킬 수 있는지 확인하기 위하여 그림 2-18과 같이 조사통의 외면 일부분을 약 1.15 cm 깎아냈다. 가공된 부분의 길이는 400 mm이다.

그림의 (a)는 조사통을 가공하기 전 조사통이 슬리브에 장전된 모습이며, (b)는 조사통을 가공한 후 조사통 내부에 중성자속 측정을 위한 Al ingot 및 Au wire가 조립된 모습이다. 그림에서 가공된 부분에 Al보다 중성자 흡수 단면적이 큰 물이 채워지므로 중성자속이 평탄화 될 것이라 예상하였다.

중성자속 측정 실험은 1차 실험과 동일한 방법으로 수행하였다. 그림 2-18의 (b)와 같이 Al ingot의 각 위치에 Au wire를 설치한 후 조사통에 장입하였다. Au wire의 사양은 1차 실험 때와 동일하며, 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 약 1시간이었다. 조사는 2001년 7월 12일 수행하였으며, 10 kW 도달 시 제어봉 위치는 260.2였다.

조사 위치는 조사통 가공 부분의 상하 중심이 원자로 노심 높이 중심에서 5 cm 아래에 놓이도록 조정하였다. 이것은 1차 실험 결과 중성자속이 최대가 되는 부분이 원자로 노심 높이 중심에서 약간 아래에 위치하였기 때문이다. 조사가 완료된 후 약 19시간 경과된 뒤에 조사통을 수조 밖으로 인출하였으며, 인출시 조사통 표면의 최대 선량은 $400 \mu\text{Sv/hr}$ 였다.

조사된 Au wire는 1차 실험과 마찬가지로 NaI(Tl) 계측 계통을 이용하여 감마 스캐닝하였으며, HPGe 계측 계통으로 절대 측정도 수행하여 절대 중성자속도 결정하였다. Cd tube는 설치하지 않았다.

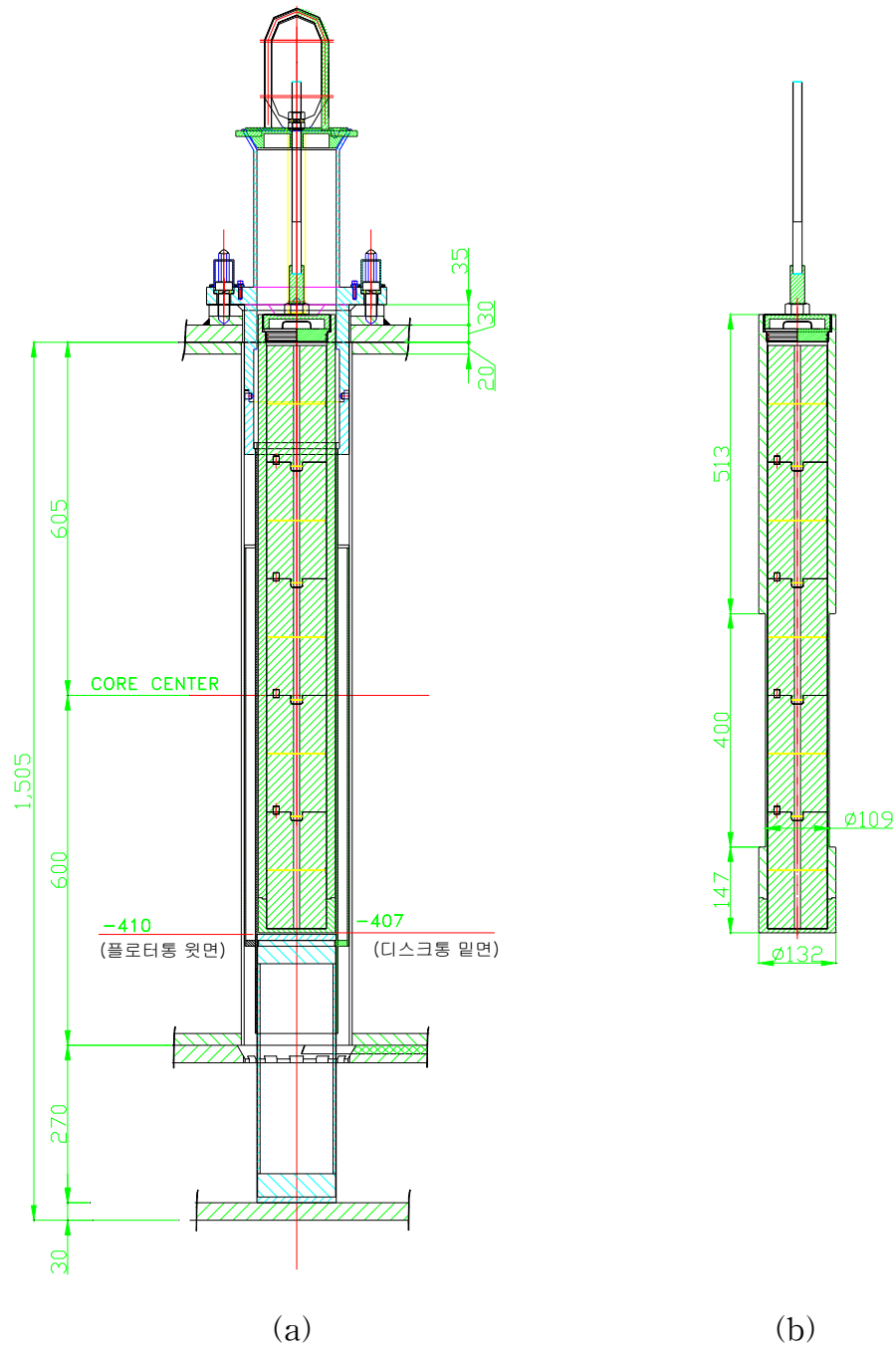


그림 2-18. 조사통을 가공하기 전 조사통이 슬리브에 장전된 모습(a)과 조사통을 가공한 후 조사통 내부에 Al ingot 및 Au wire가 조립된 모습.

2.2.4. 2차 측정 결과

그림 2-19 및 2-20은 각 Al ingot의 상부면과 축방향 중심에 azimuthal

방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율을 측정된 결과이다. 또한 그림 2-21은 축방향 측정값, azimuthal 방향 각 측정값의 평균 및 MCNP의 계산 결과를 나타내고 있다. 모든 측정값은 -33.5~23.5 cm 사이의 축방향 측정값의 단순 평균으로 규격화하였으며, 1차 실험 때와 동일한 Cd 비를 가정하여 열중성자 반응만을 고려하였다. 그림 2-19는 각 ingot의 상부면에 설치한 반경 25 mm 위치의 홈에 설치한 azimuthal 방향 Au wire의 반응율 측정값이며, 그림 2-20은 각 ingot의 중앙에 설치한 반경 50 mm 위치의 홈에 설치한 Au wire의 반응율 측정값이다. 그림 2-19로부터 알 수 있듯이 측정 시작 지점으로부터의 거리가 7.5 cm일 때의 측정값이 가장 크게 나타났으므로 이 위치가 노심에서 가장 가까웠을 것으로 생각되며, 그림 2-20에서는 15 cm 일 때가 노심에서 가장 가까웠을 것으로 추정된다. Azimuthal 방향의 측정값은 측정값의 통계 오차가 비교적 커서 각 측정값의 산포 정도가 크다. 그러나 그림 2-21에서 알 수 있는 바와 같이 azimuthal 방향 각 측정값의 평균은 축방향 측정값과 잘 일치한다. 또한 축방향 측정값으로부터 AI 조사통의 가공 부분에서 중성자속이 매우 평탄해졌음을 알 수 있다. 가공 후의 조사통에 대한 MCNP 계산 결과도 측정 결과와 상당히 잘 일치하므로 MCNP 계산의 신뢰성을 또다시 입증하였다.

이와 같이 AI 조사통을 가공하여 중성자속을 평탄화시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 azimuthal 방향 측정값의 평균이 축방향 측정값과 유사하므로 ingot을 회전시키면서 조사를 수행하면 반경 방향의 조사량도 균일하게 유지할 수 있음도 확인되었다. 즉, 반경 방향의 조사 균일도를 위해 ingot 회전 이외에 다른 사항을 고려할 필요는 없을 것으로 예상된다.

조사통을 가공한 경우의 MCNP 계산 결과도 1차 조사 실험 때와 마찬가지로 측정값과 매우 잘 일치한다. 따라서 MCNP로 축방향의 조사량 균일도를 향상시키기 위한 조사통 설계가 가능함을 확인하였다.

그림 2-22는 절대 중성자속 측정값과 MCNP 계산 결과인데 1차 측정 때와 마찬가지로 큰 차이를 나타냈다.

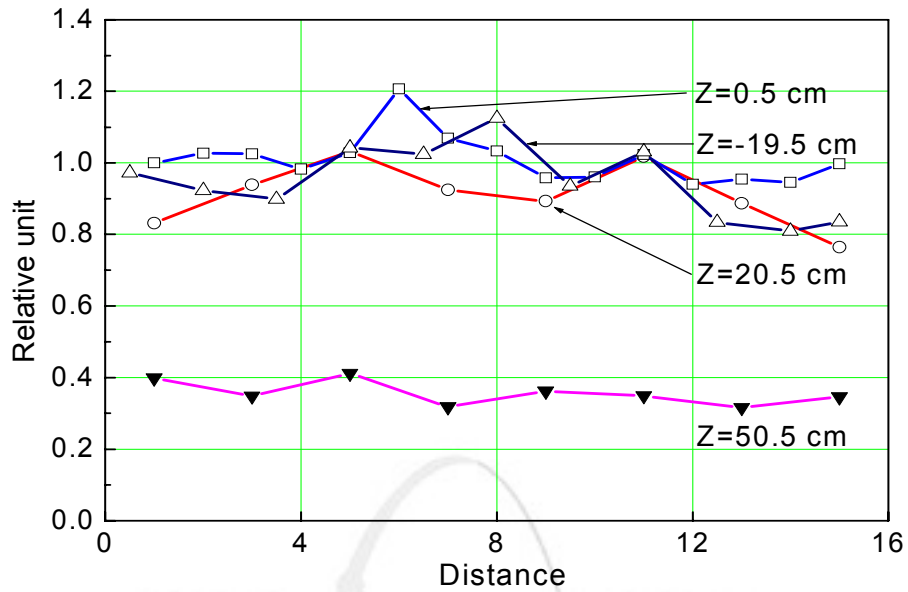


그림 2-19. 조사통 가공 후 Al ingot의 상부면에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율

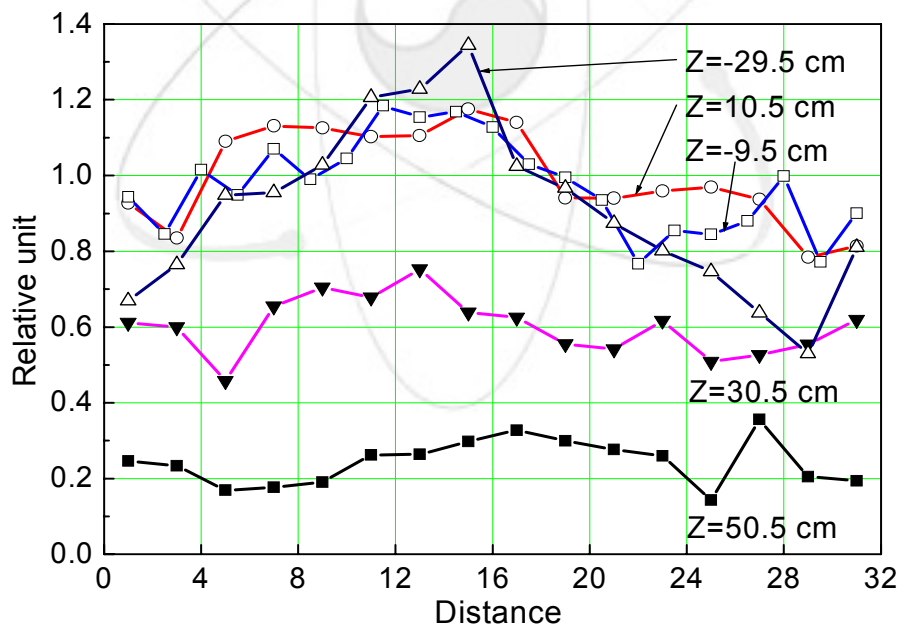


그림 2-20. 조사통 가공 후 Al ingot의 축방향 중심에 azimuthal 방향으로 설치한 Au wire의 열중성자 반응율.

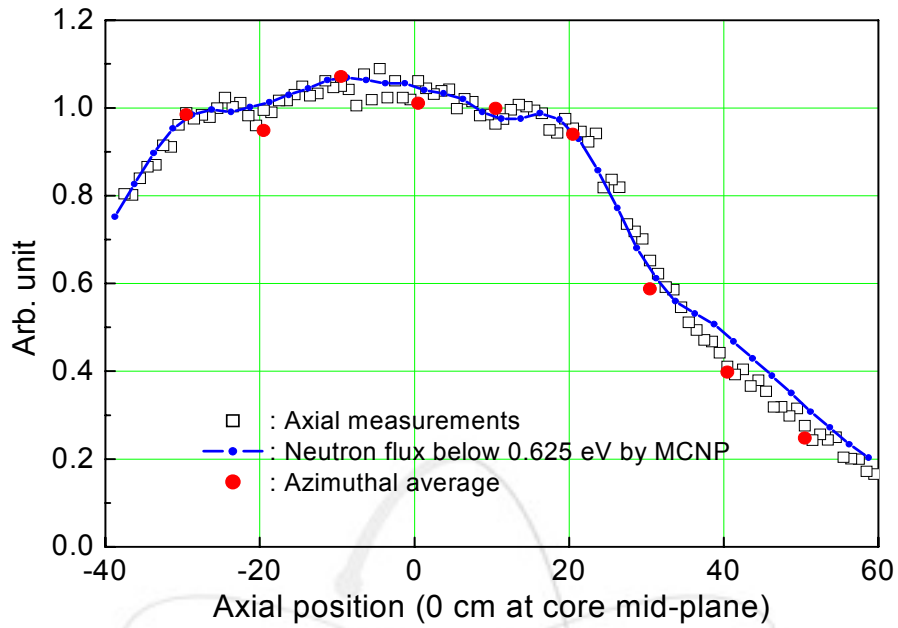


그림 2-21. 조사통 가공 후 측정된 축방향 열중성자 반응율, azimuthal 방향 각 측정값의 평균 및 MCNP 계산 결과와의 비교.

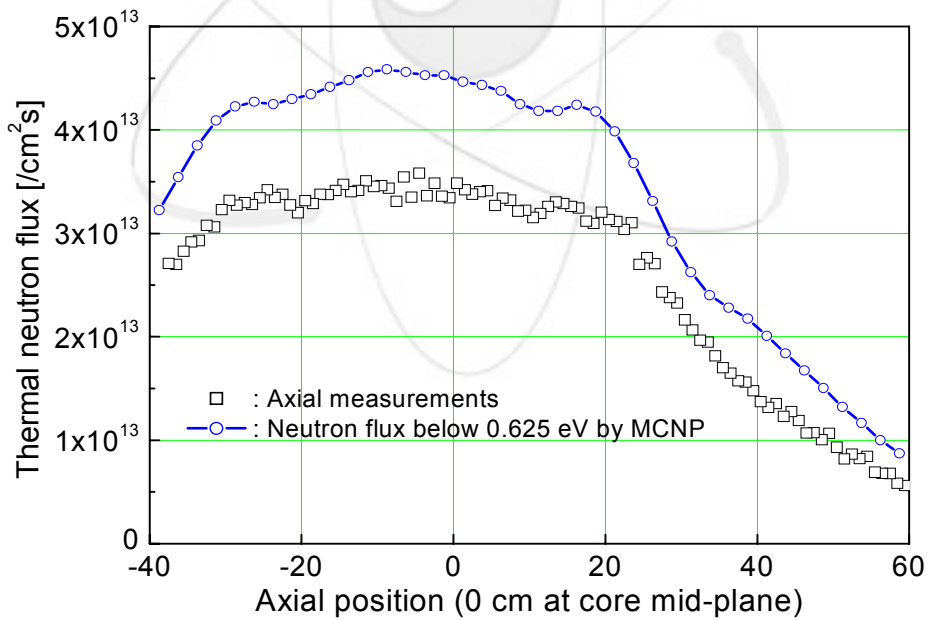


그림 2-22. 절대 중성자속 측정값 및 MCNP 계산 결과.

제 3 장 설계, 제작된 중성자 스크린 실증 실험

3.1. 개 요

하나로 NTD2 조사공에서 NTD 서비스를 수행하기 위한 기본 작업으로서 제2장에서 설명한 바와 같이 NTD 조사공내의 중성자속 분포를 계산 및 측정을 통하여 확인하여 중성자속 분포의 평탄화 가능성 및 설계 수단인 MCNP 계산 모델링의 타당성을 검증하였다. 이러한 작업을 바탕으로, 중성자속 분포를 균일화할 수 있는 중성자 스크린이 설계, 제작되었다. 따라서, 제작된 스크린을 이용하여 NTD 조사공에서 Si 단결정이 있는 상태에서의 중성자속을 측정하여 그 분포를 확인하면, 목표 비저항 균일도의 만족 여부를 확인할 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 NTD2 조사공에 제작된 조사 장치 및 Si 단결정이 설치되어 있는 상태에서 중성자속 분포를 측정하여 중성자 조사량의 균일화 정도를 확인하였으며, 이를 통하여 도출된 조사 장치의 미비점을 보완하였다.

3.1.1. 설계, 제작된 중성자 스크린

NTD2 조사공내의 중성자속 분포를 균일화하기 위한 중성자 조사 장치는 아래 그림 3-1과 같이 설계되었으며, 최적화된 중성자 스크린 사용시 Si ingot에서의 상대 중성자속 분포는 그림 3-2와 같다[3-1]. 그림 3-1에서 알 수 있는 바와 같이 하나로 NTD2 조사공에 설치되는 중성자 조사 장치는 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 첫째는 조사통이 장입되는 슬리브로서 NTD2 조사공에 항상 위치되어 있으면서 조사통의 장입 및 회전의 가이드 역할을 하고 상부에는 중성자속 측정을 위한 SPND(Self-Powered Neutron Detector)가 설치된다. 두번째는 Si ingot이 조사되는 동안 일정한 위치를 확보할 수 있도록 지탱해 주고, 외벽을 가공하여 중성자속을 평탄화할 수 있게 스크린으로 사용되는 조사통이다. 조사통 내부에는 Si ingot과 함께 조사량 측정 시료를 설치할 Bi 판, Si ingot 양끝의 중성자속을 높이기 위한 흑연통 등이 설치된다. 셋째로는 조사 장치의 장입, 인출 시 원자로 반응도에 미치는 영향을 최소화하기 위한 장치인 floater로서 속이 빈 알루미늄 통을 Si ingot 아래에 위치시켜 Si 인출 시 빈자리

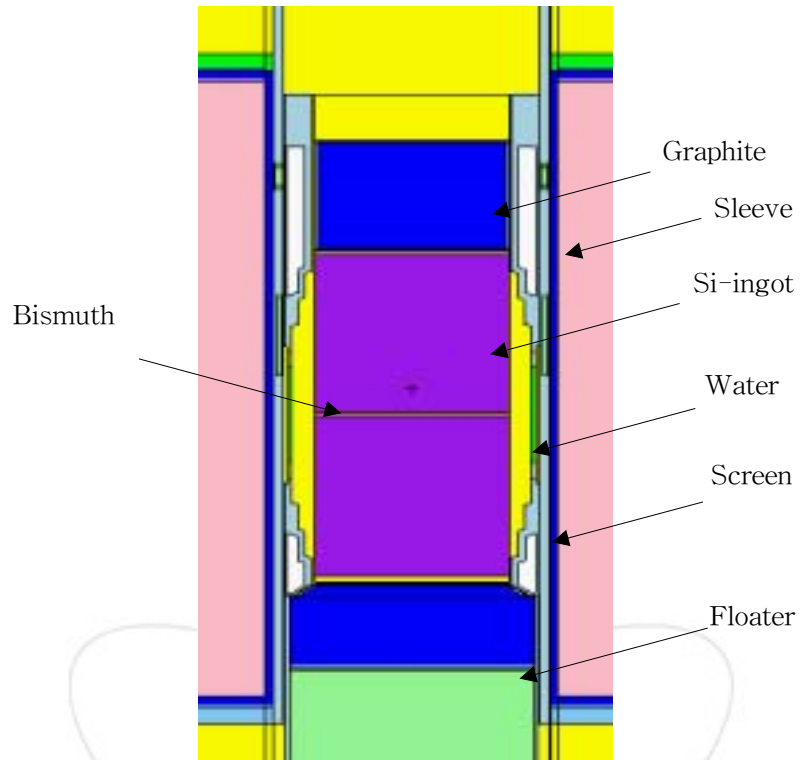


그림 3-1. 최적 중성자 스크린 모델(가로로 확대).

최적화 모델에 의한 중성자속 분포

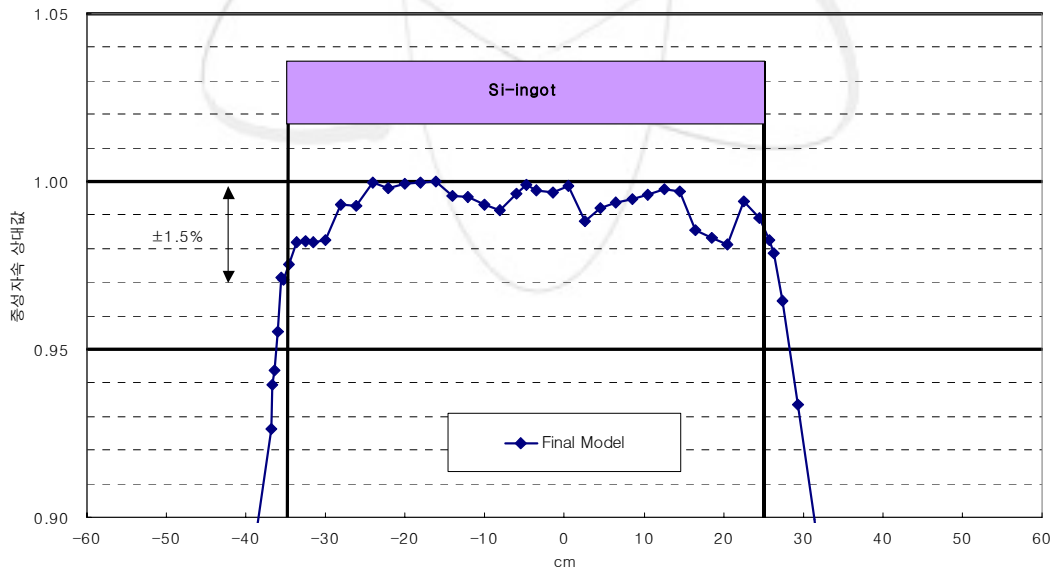


그림 3-2. 최적화된 screen 사용시 Si ingot에서의 상대 중성자속 분포.

에 물 대신 floater가 위치하게 함으로써 Si 조사가 반응도에 미치는 영향을 최소화한다.

이러한 세 부분 외에 조사통의 구동 및 회전을 담당하는 구동 장치와 SPND 중성자 계측 계통이 있다[3-2].

중성자 스크린은 단결정을 담는 조사통의 외벽을 가공한 것으로서 아래와 위쪽 끝 부분에는 속이 빈 공기층을 두어 끝 부분에서 중성자속이 낮아지는 것을 최소화하도록 하였고, 중간 부분에는 물 층의 두께를 단계적으로 증가시켜 중성자속을 평탄화하도록 하였다. 또한, 위에서 설명한 바와 같이 Si ingot 양끝에는 흑연통을 두어 끝 부분의 중성자속을 높이도록 하였다. 계산 모델에는 슬리브, 조사통 외벽을 이용한 스크린, Si ingot, 반사체, floater가 포함되어 있다.

그림 3-2는 최적 중성자 스크린 모델에 대해 계산된 축방향 중성자속 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이 Si ingot이 조사되는 구간에서 $\pm 1.5\%$ 이내의 중성자속 균일도를 나타낸다. 실제로는 연소 효과로 인하여 양끝의 중성자속이 약간 높아질 가능성이 있으며, 직경이 약간 작은 단결정이 들어갔을 때에도 양끝에서의 중성자속이 약간 높아질 수 있다. 따라서 설계 단계에서는 단결정 중심 부분의 중성자속이 약간 높은 분포를 갖도록 최적 조건을 정하였다. 그림 3-3은 설계된 중성자 스크린의 모양과 이에 대응되는 중성자속을 나타낸 그림이다.

하나로 운전시 제어봉 위치는 노심 상태에 따라 변한다. 따라서, 제어봉 위치 변화에 따른 중성자속 분포 영향을 분석하였으며, Si ingot의 조사 균일도를 유지하기 위해 그림 3-4와 같이 제어봉 위치에 따른 조사 위치를 결정하였다.

그림 3-5는 이러한 설계 개념을 반영하여 제작된 조사통이 슬리브에 장입된 모습과 상세 부분을 도식적으로 나타낸 그림이다.

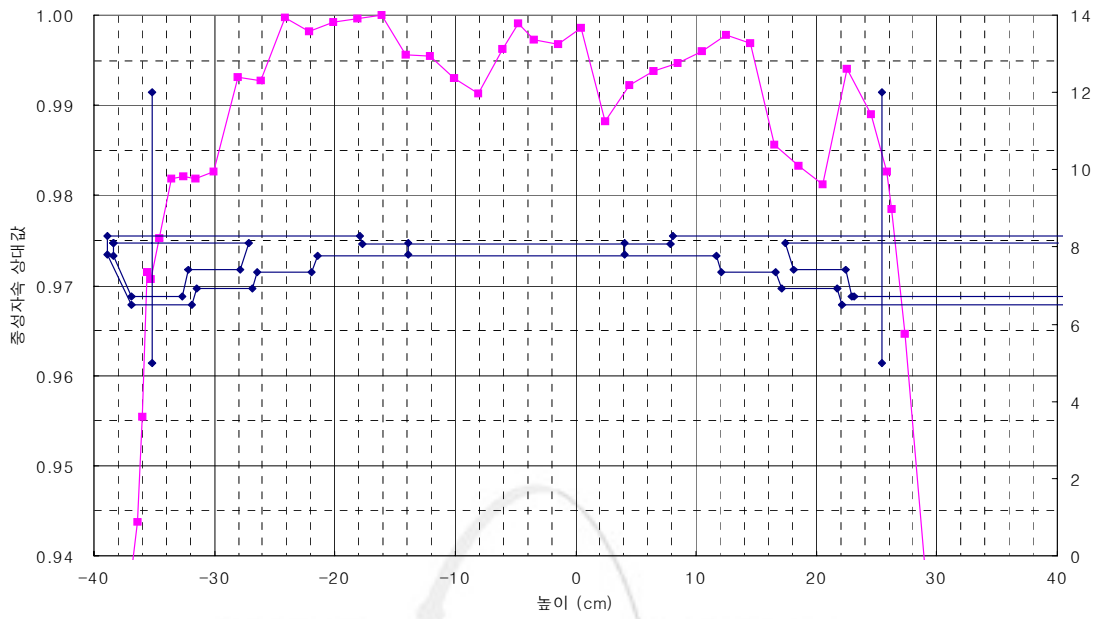


그림 3-3. 설계된 중성자 스크린의 모양과 이에 대응되는 중성자속 (제어봉 위치 350 mm, 단결정 중심 위치 -4.9 mm).

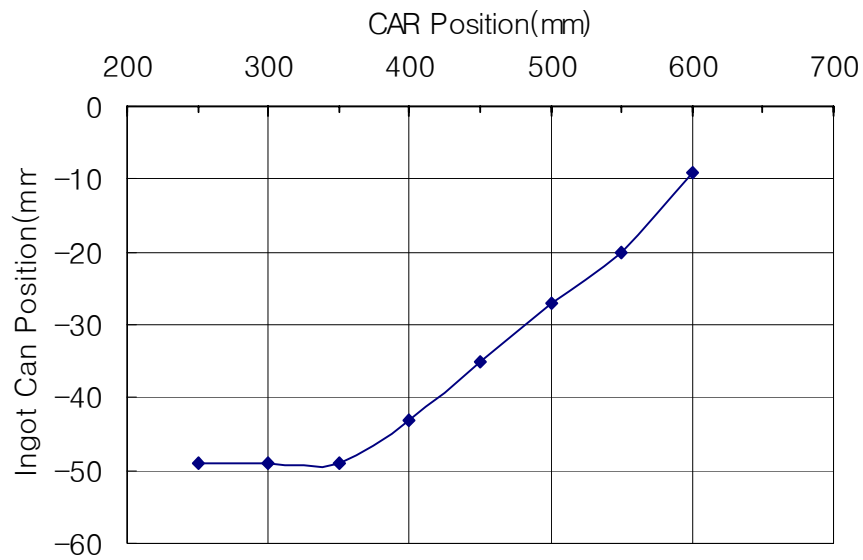


그림 3-4. 제어봉 위치에 따른 단결정의 최적 위치 변화 경향.

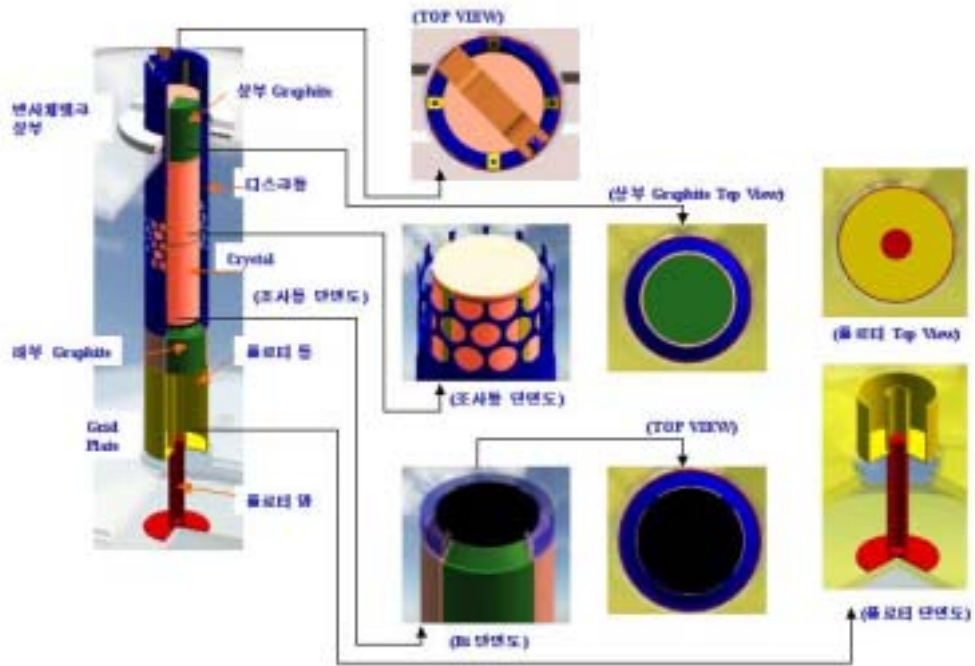


그림 3-5. 제작된 조사통이 슬리브에 장입된 모습 및 상세 부분.

3.1.2. 실험에 사용된 Si ingot

실험에 사용된 Si 단결정은 길이가 47.9~53.2 mm인 Si 단결정 12개 1 set와 길이가 315.5, 302.5 mm인 단결정 2개 1 set이다. 길이가 약 5 cm인 단결정 12개의 직경은 126.1 ± 0.2 mm이며, 12개 토막의 전체 길이는 61.7 cm로서 설계에서 가정한 60 cm보다 약간 길었다. 이 단결정 set를 설치하는 경우에는 조사통 중간에 설치되는 Bi 판을 기준으로 하여 아래쪽에는 31.2 cm, 위쪽에는 30.5 cm가 놓이도록 하였다. 길이가 약 30 cm인 단결정의 직경은 125 mm로서 조사 장치 설계시 가정한 $126.1 \pm 0.2 \sim 127.2 \pm 0.3$ mm 보다 작다. 또한 이 단결정 가운데 길이가 302.5 mm인 단결정은 수직도가 좋지 않아 측면의 편차가 최대 3.4 mm였다.

3.2. 중성자 스크린 설치 후 중성자속 측정

설계, 제작이 완료된 NTD 조사 장치를 하나로 NTD2 조사공에 설치한 후 Si 단결정이 조사 장치 내에 있는 상태에서 중성자속 분포 측정을 수행하였다. 중성자속 분포를 확인하여 조사 균일도가 만족스럽지 못하면 중성자 스크린을 개선해야 하며, 이러한 수정을 하기 위해서는 중성자 스크린의 방사능 준위가 충분히 낮아야 한다. 따라서 중성자속 분포 측정은 영출력에서 수행하였다.

측정 사항은 단결정 길이 방향의 중성자속 분포 및 조사량 측정용 시료가 설치되는 Bi 디스크에서의 절대 중성자속이다. 단결정 반경 방향으로의 중성자속 분포는 변화가 적기 때문에 측정에서 제외하였으며, Cd 비도 이미 측정이 수행되었고, 변화가 적을 것으로 예상되어 측정하지 않았다.

중성자속 측정용 방사화 시료로는 영출력 실험에서 충분한 방사능을 얻을 수 있도록 Au wire를 사용하였으며, 각 단결정의 측면에 단결정 축 방향으로 알루미늄 테이프를 이용하여 설치하였다. Au wire를 알루미늄 테이프 보다 두께가 작은 스카치 테이프로 붙이는 방법을 생각하였으나, Au wire를 붙인 상태에서 냉각수에 수 시간 담가두면 스카치 테이프는 모두 떨어졌다. 이로 인하여 접착력이 강한 알루미늄 테이프로 Au wire를 설치하였다. 알루미늄 테이프의 표면에는 얇은 절연막이 코팅되어 있는데, 이 절연막은 조사가 끝난 뒤에 부슬부슬 벗겨졌다. 조사가 끝났을 때는 테이프의 접착력도 매우 약해져서 쉽게 떨어졌다. 이러한 사실은 고출력에서 장시간 조사시 이러한 테이프를 사용하기 곤란함을 나타낸다.

또한 상부, 중앙, 하부에 놓이는 Bi 판에는 Au wire를 설치하여 절대 중성자속을 구하였다. 측정 실험은 3회 실시하였으며, 실험 상태에서 NTD2 조사공의 중성자속에 가장 큰 영향을 미치는 IP3 조사공에는 물이 채워진 상태였고, LH 조사공에는 빈 알루미늄 마개가 설치되어 있었으나 이 마개에는 누설 징후가 있으며, 이곳에 어느 정도의 물이 채워져 있는지는 아직 알 수 없다.

3.2.1. 1차 측정 실험

1차 실험에서는 설계된 조사통을 그대로 사용하였으며, 길이 5 cm인 단결정 12개의 표면에 축 방향으로 한 개씩 Au wire를 붙이고, 단결정을 통

에 넣을 때는 wire가 azimuthal 방향의 한 위치에 놓이도록 하였다. 조사 높이는 조사통의 중심이 노심 중심에서 49 mm 아래에 놓이도록 하였으며, 이에 따라 조사통의 중심 위치는 -49 mm가 된다. 제어봉 위치가 250 ~ 350 mm일 때는 이 위치가 최적의 것으로 계산되었다[3-3]. 원자로 출력은 10 kW이었고, 조사 시간은 3시간, 조사시의 제어봉 위치는 298.0 mm이었다. 조사된 Au wire의 방사능은 NaI(Tl) 계측기로 scanning 측정하였으며, 측정 슬릿 폭은 4 mm였다.

3.2.2. 1차 측정 결과

설계된 조사통을 그대로 사용하고, 길이가 약 5 cm인 단결정 12개의 표면에 축 방향으로 Au wire를 붙인 후 NTD2 조사공에서 조사시켜 Au wire의 포화 방사능을 NaI(Tl) 계측기로 scanning한 결과는 그림 3-6과 같다. 그림에서 각 측정값은 전체 평균값으로 규격화하였다. 그림의 x-축은 원자로 노심의 중심 높이를 0으로 하여 측정값의 위치를 나타낸 것이다. 측정값의 통계 오차는 1.0 %이내이다.

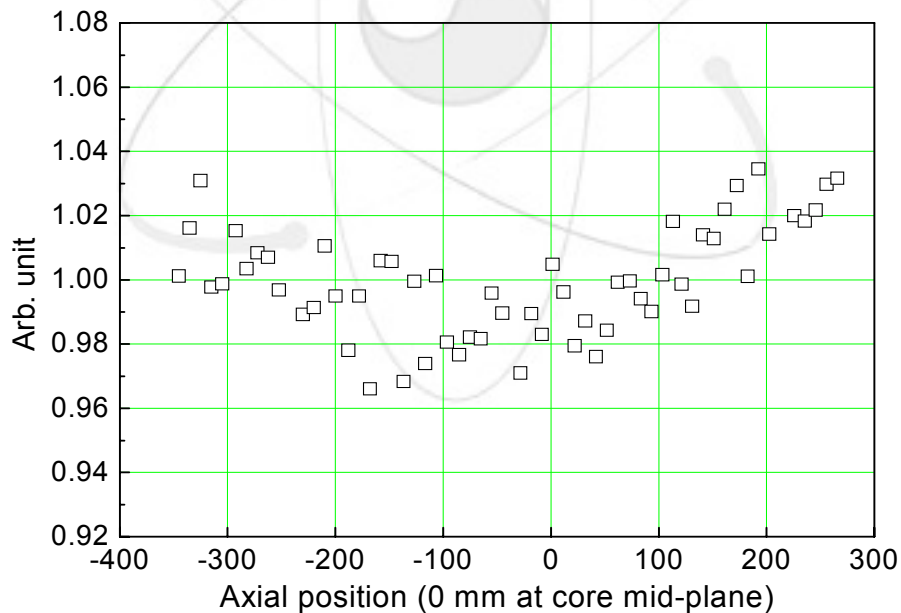


그림 3-6. NTD2 조사공에서 조사시킨 Au wire 방사능을 scanning한 결과.

그림 3-6에서 알 수 있는 바와 같이 측정된 Au의 포화 방사능은 노심 상하방향의 가운데 부분이 낮고 가장자리가 약간 높다. 또한 노심 위쪽이 아래쪽보다 약간 높으며, 전체 측정값사이의 차이는 7 %이내이다. MCNP 계산으로 예측한 결과는 가운데가 약간 높았다. 이러한 계산과 실험 결과와의 차이가 발생한 것은 핵연료의 연소 효과를 작게 고려했기 때문이라고 생각된다. MCNP는 연소된 핵연료를 취급하지 못하므로 모두 새 연료로 가정하고 계산한다. 핵연료의 연소는 노심의 중심부에서 상대적으로 빨리 진행되기 때문에 MCNP 계산으로 모든 부분에서 동일한 중성자속을 갖도록 중성자 스크린을 설계하면 가운데 부분의 중성자속이 작아지고 아래와 위 부분의 중성자속은 높아진다. 따라서 계산에 의한 설계 단계에서는 가운데 부분이 가장자리에 비하여 중성자속이 약 3 % 높도록 설계하였다. 그러나 측정에서는 3~4 % 낮게 나타났다. 즉 중성자속 분포 예측에서 계산과 측정 사이에는 6~7 %의 차이가 있는 것으로 나타났다.

표 3-1은 절대 중성자속 측정용 Bi 판에 설치한 Au wire의 방사능을 측정하여 구한 절대 중성자속이다. 표로부터 알 수 있는 바와 같이 Bi 판이 있는 위치에서는 가운데 부분의 중성자속 측정값이 가장 크게 나타났고, 양 가장자리가 오히려 작게 나타나 그림 3-6의 결과와 다르다. Bi 판의 두께가 6 mm이고, 중성자속 측정용 Au wire는 Bi 판 가운데 위치하므로 Si 단결정으로부터 Au 시료까지의 거리는 3 mm가 된다. 따라서 그림 3-6 및 표 3-1의 실험 결과로부터 단결정이 위치하는 부분이 지나면 중성자속이 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

표 3-1. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속.

위 치 [mm]	중성자속 [n/cm ² sec]	상대값
276.86	1.00571×10 ¹⁰	0.98717
-40.46	1.01878×10 ¹⁰	1
-353	1.00599×10 ¹⁰	0.98745

3.2.3. 2차 측정 실험

그림 3-6에 나타난 바와 같이 설계, 제작된 조사통을 수정없이 사용한 경우에는, 가운데 부분의 중성자속이 현저하게 낮게 나타났다. 이에 따라 이러한 경향을 보완하기 위한 2차 실험을 수행하였다. 1차 측정 결과를 바탕으로 중성자속 균일도를 향상시키는 방법을 모색하였으며, 중심 부분의 중성자속을 증가시키기 위해 조사통 중앙 부분에 직경 1.2 mm의 알루미늄 wire를 감아 물 층의 두께를 감소시켜 중심 부분에서의 중성자 흡수 반응 수를 감소시켰다. 또한 1차 실험시 조사통의 높이는 제어봉 위치에 따른 최적 조건이었음에도 불구하고 노심 윗부분의 중성자속이 아랫 부분의 중성자속보다 크게 나타났으므로 1차 실험때보다 조사통을 2 mm를 올려서 조사시켰다. 이에 따른 조사통 중심 위치는 -47 mm이다. 2차 측정에서도 1차 측정과 마찬가지로 길이 5 cm인 단결정 12개를 이용하여 Au wire를 설치하였다. 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 2시간 20분이었으며, 조사시의 제어봉 위치는 299.8 mm이었다. 각 단결정을 조사통에 설치할 때 1차 시험과는 달리 Au wire가 azimuthal 방향으로 놓이는 위치를 일정하게 맞추지 않았는데 이것은 구동 장치가 회전하므로 Au wire가 놓이는 위치를 일정하게 맞추지 않아도 축방향의 중성자속 분포를 측정하는 것은 문제가 없기 때문이다. 그런데 조사 도중에 구동 장치의 회전이 일시 정지하였다. 따라서 회전이 정지한 상태가 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다. Au wire의 방사능 scanning에는 Au의 방사능이 충분하므로 HPGe 계측기를 사용하였으며, 측정 슬릿 폭은 1차 실험시와 마찬가지로 4 mm였다.

3.2.4. 2차 측정 결과

MCNP 계산을 통한 조사통 설계에서는 축방향 상하 중성자속이 서로 대칭이 되도록 하였는데 전체 단결정의 길이가 설계 기준치인 60 cm보다 1.7 cm 더 긴데도 불구하고 그림 3-6의 1차 측정 결과를 살펴보면 위쪽 끝 부분에서의 중성자속이 아래쪽 끝 부분보다 약간 높다. 또한, 가운데 부분의 중성자속이 낮게 나타났다.

이러한 결과를 바탕으로 중성자 스크린의 가운데 부분에서 물의 양을 약간 줄이고, 단결정을 약간 더 올려서 조사시키면 조사 균일도가 향상될

것으로 추정하였다. 즉 가운데 부분에 알루미늄 wire를 감으면 알루미늄 wire가 물을 대체하여 중성자속이 약간 높아질 것이며, 조사통을 약간 올리면 중성자속이 대칭이 될 것으로 기대하였다. 이에 따라 조사통의 가운데 부분에 직경 1.2 mm의 알루미늄 wire를 감았으며, 조사 위치도 1차 시험 때보다 2 mm를 올렸다. 그림 3-7은 측정된 Au wire의 방사능을 HPGe 계측기로 scanning한 결과이다.

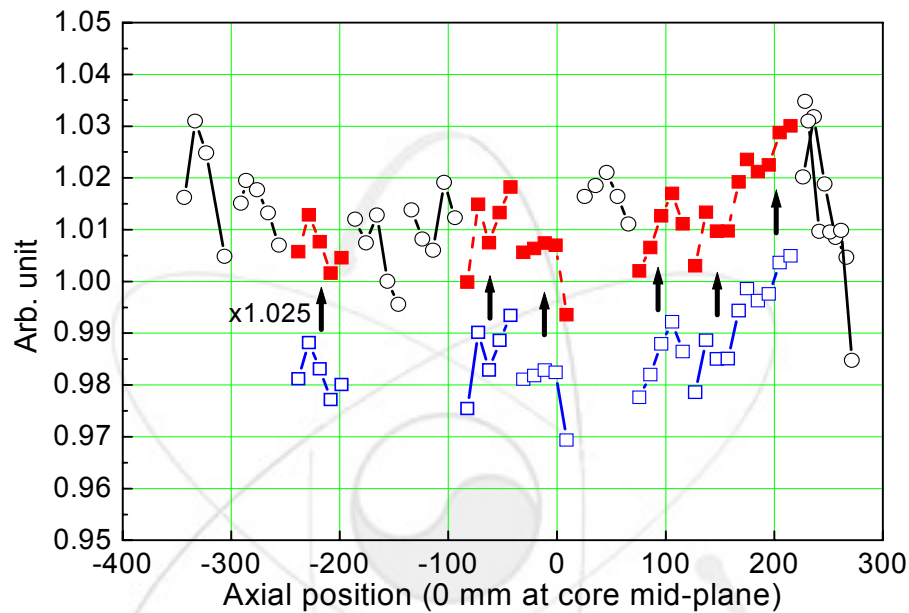


그림 3-7. 조사통에 1.2 mm Al wire를 감고 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과(조사 위치 : -47 mm).

그림에서 보정 전 측정 결과('□')가 불연속적인 양상을 보이는 것은 조사 도중 조사통의 회전이 잠시 멈추었기 때문이며, 회전 정지 시간은 정확하게 알 수 없었다. 하나로 NTD2 조사공은 노심 바깥으로부터 약 35 cm 떨어져 있으므로 원통형 Si 단결정의 노심에 가까운 쪽은 중성자속이 높고 노심에서 멀리 떨어져 있는 부분의 중성자속은 낮다. 제2장에서 살펴본 바와 같이 알루미늄 ingot으로 모의 실험을 수행하였을 때, ingot 반경 방향의 최대값과 최소값의 차이는 약 30 %였다. 이러한 차이는 조사통을 회전시킴으로써 상쇄된다. 따라서 조사 시간이 200분인 경우, 20분간 정지하였다면 각 토막별로 최대 3 %의 차이가 발생할 수 있다.

그림에서 측정값이 낮은 5개의 Au wire 측정값을 2~3 % 증가시키면 전반적으로 연결이 잘 되는 분포를 나타내었는데 이러한 결과로부터 회전이 정지한 시간은 전체 조사 시간의 약 10 %로 추정할 수 있었다. 그러나 이렇게 보정을 한 후의 조사량 분포도 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가운데 부분이 가장자리보다 약간 낮은 경향성을 나타냈으며, 설계 요건 상의 Si 단결정 조사 부분에서 상하 분포의 대칭성은 우수하였다. 또한, Si 단결정의 양쪽 끝부분에서 피크가 나타난 후 급격하게 감소하는 현상이 선명하게 나타났다. 회전이 멈추지 않았다면 ± 1.5 % 이내의 조사 균일도를 가질 것으로 추정되었다.

표 3-2는 절대 중성자속 측정용 Bi 판에 설치한 Au wire의 방사능을 측정하여 구한 절대 중성자속이다. 1차 실험과는 달리 Bi 판이 있는 위치에서 하부 및 중앙에서의 중성자속이 비슷하며, 상부의 중성자속은 이 두 값보다 작은 것으로 나타났다. 이는 그림 3-7에서도 확인할 수 있는데 중앙과 하부 Bi 위치에서의 중성자속은 비슷한 반면 상부에서는 중성자속이 피크를 나타낸 후 급격히 감소하여 Bi 판 위치에서는 표 3-2에 나타난 바와 같은 절대 중성자속 비를 나타낼 것으로 예상되었다.

표 3-2. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속.

위 치 [mm]	중성자속 [n/cm ² sec]	상대값
278.86	1.35606×10^{10}	0.98038
-42.46	1.38321×10^{10}	1
-351	1.39366×10^{10}	1.00755

3.2.5. 3차 측정 실험

3차 실험에서는 길이가 약 30 cm인 두 단결정을 조사시켰다. 이 단결정에 대한 조사를 의뢰한 의뢰자가 제공한 자료는 다음과 같다.

- 1) Ingot No. 50199/06/148
 - Length 315 ± 0.01 mm, Weight 9016 g
 - Diameter 126.0 ~ 126.2 mm
 - 수직도 $90 \pm 0.5^\circ$
 - Orientation [100] < 2.00°
 - Type/Dopant N/Ph
 - Resistivity: Seed 4460 Ω -cm, Opposite 3570 Ω -cm
- 2) Ingot No. 50225/87/088
 - Length 301 mm, Weight 8642 g
 - Diameter 125.0 ± 2 mm
 - 수직도 자료는 없음
 - Orientation [111] < 2.00°
 - Type/Dopant N/Ph
 - Resistivity: Seed 3890 Ω -cm, Opposite 4080 Ω -cm

그러나, 단결정의 확인 결과, 1)번 단결정의 경우에도 직경은 125.0 ± 2 mm로 되어 있어 조사 요구시의 자료와 달랐다. 측정 결과는 125.0 mm로 기술된 것과 같았으나 길이는 상당한 차이를 나타냈다. 1)번은 길이가 315.52 mm이나 원주 방향에 따라 0.45 mm의 차이를 나타냈고, 2)번은 길이가 302.54 mm이나 원주 방향에 따라 1.35 mm나 차이가 있었다. 즉, 이러한 결과는 단결정을 자를 때 수직이 잘 맞지 않았음을 나타낸다. 조사의뢰자는 단결정 제작시 약간 경사지게 자른다고 하였다. 단결정에서 원자는 3차원 배열을 하고 있는데, 단면에는 2차원 배열이 나타난다. 이 배열을 나타내기 위하여 특정 방향으로 약간 경사를 둔다는 것이다. 웨이퍼에서는 한쪽을 잘라내어 결정 방향을 알 수 있도록 한다. 그런데 각 토막마다 경사각이 많이 다르다. 이와 같이 ingot의 수직도에 오차가 크면 중성자 스크린으로 사용하는 물 층의 두께가 균일하게 유지되지 않으므로 균일 중성자 조사에 어려움이 있다. 즉, 수직도가 좋지 않은 단결정을 조사통 내부에 위치시키면 한쪽으로 기울어져 단결정과 조사통사이의 물 층 두께가 달라지게 된다. 이 경우 물 층의 두께가 가장 큰 곳은 약 3 mm가 된다.

이에 따라 물 층의 두께에 따른 중성자 조사량 변화 경향을 조사하기

위하여 각 단결정이 가장 많이 기울어진 양쪽 즉, 윗 단면에서 보았을 때 물 층 두께가 가장 큰 부분과 작은 부분에 각각 Au wire를 설치하였으며, 물 층 두께가 중간인 부분에 Au wire를 설치하여 모두 3개의 Au wire를 설치하였다. 또한 2차 시험 결과에서도 가운데 부분이 여전히 중성자속이 낮게 나타났으므로, 2차 실험에서 1.2 mm 알루미늄 wire를 감았던 부분에 이번에는 직경 1.8 mm의 알루미늄 wire를 감았다. 조사 위치는 2차 시험과 같이 -47 mm로 하였다. 원자로 출력은 10 kW, 조사 시간은 3시간이었으며, 조사시의 제어봉 위치는 269.4 mm였다. 각 실험 후 Bi 판에 설치되었던 Au wire는 표준선원으로 검정된 HPGe 절대 측정 계통을 이용하여 절대 측정 후 중성자속을 결정하였다.

중성자 조사 실험 중에는 단결정 조사통을 매달고 있는 체인의 꼬임이 1,2차 실험을 할 때보다 커서 이전보다 통이 더 위로 올라갔으며, 처음 조사통이 회전하기 시작할 때 약간 걸리는 듯한 느낌을 받았다. 따라서 통의 위치를 재조정하였다. 이러한 현상이 발생한 원인은 직경 1.8 mm의 알루미늄 선을 감은 탓일 수도 있고, 위쪽 단결정의 수직도가 좋지 않기 때문에 단결정이 조사통 내에서 기울어져 놓이므로 통의 중심과 무게 중심이 일치하지 않기 때문일 수도 있다.

3.2.6. 3차 측정 결과

그림 3-8은 3차 실험 결과이며, 그림에서 'U'는 상부에 설치된 Au wire의 측정 결과이고, 'L'은 하부에 설치된 Au wire 측정 결과이다. 또한, 'O'는 Bi 판에 설치한 Au wire의 방사능을 절대 측정한 결과이며, 이렇게 구한 중성자속은 표 3-3과 같다. 또한 그림 3-9는 3개 wire의 측정값을 평균한 결과를 나타낸 것이다. 평균값을 계산할 때 물 층 두께가 가장 큰 부분과 작은 부분은 가중치 1을 사용했고, 물 층 두께가 중간인 경우에는 가중치를 2로 하여 계산하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 아래쪽 단결정은 수직도가 그리 나쁘지 않으므로 조사통 내의 중앙에 잘 위치해서 각 wire 위치에서의 물이 차지하는 물 층의 두께가 비슷하기 때문에 3개의 측정값이 비슷하게 나타났다. 그러나 위쪽 단결정은 수직도가 좋지 않기 때문에 조사통 내부에서 비스듬히 기울어 놓이게 된다. 따라서 물이 차지하는 부분의 차이가 크며, 이에 따라 세 측정값의 차이가 크며, 위로 올라갈수록 그 차이가 뚜렷하다.

조사통 내부의 3 mm의 물 층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다.

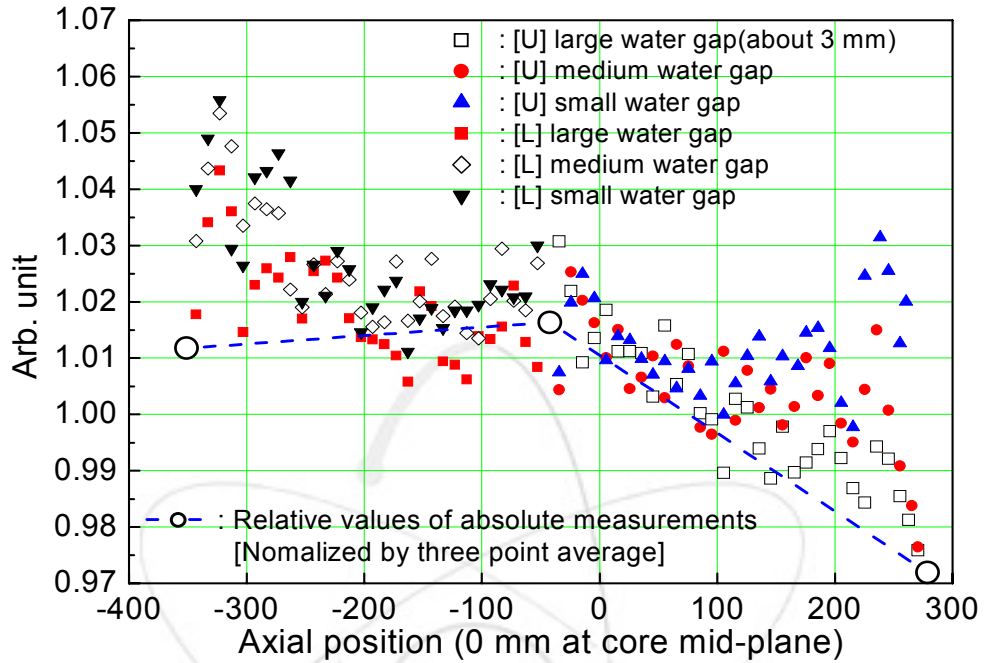


그림 3-8. 조사통에 1.8 mm Al wire를 감고, 30 cm Si 단결정 2개에 붙여 조사시킨 Au wire의 방사능을 scanning한 결과.

표 3-3. Bi 판에 설치한 Au wire로부터 구한 절대 중성자속.

위 치 [mm]	중성자속 [n/cm ² sec]	상대값
278.86	1.42832×10^{10}	0.95630
-42.46	1.49359×10^{10}	1
-351	1.48693×10^{10}	0.99554

그림 3-8로부터 Bi disk에 설치한 Au wire의 방사능 가운데 중간 것은 전체적인 경향성에서 약간 벗어나지만 양 가장자리의 2개는 전체 경향성

과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 이번 측정 결과는 1차 측정과는 달리 아래가 높고 위가 낮은 경향성이 뚜렷하였다. 그러나 실제 Si 단결정이 놓일 부분에서 축방향 측정값들의 차이는 $\pm 2.5\%$ 이내였다. 한편 이번 측정에서는 각 측정값의 국부적인 경향성이 뚜렷하게 나타났다. 즉, 단결정 양쪽 끝에서는 국부적으로 위로 볼록한 봉우리 현상이 확실하게 나타난다. 봉우리가 있는 구간은 대체로 스크린의 턱과 턱 사이에 해당된다.

그림 3-9는 그림 3-8에 나타난 동일한 축방향 위치에서의 세 측정값의 평균값을 나타낸 것이다. 앞에서 기술한 바와 같이 평균은 물 층의 두께가 가장 큰 경우와 가장 작은 경우의 측정값 및 중간 경우의 측정값의 두 배를 더한 후 4로 나누어 구하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Bi disk에 설치한 Au wire의 방사능 가운데 중간 것은 전체적인 경향성에서 약간 벗어나지만 양 가장자리의 측정값은 전체 경향성과 잘 일치한다. 그림에서 측정값들이 축방향 길이에 따라 오르내리는 경향이 있음을 알 수 있는데 이는 중성자 스크린의 각진 모서리와 관계되는 것으로 판단된다.

그림 3-10은 MCNP로 NTD2 조사공의 중성자속을 계산할 때 단결정 표면 및 내부 평균 중성자속 분포를 따로 계산하여 비교한 그림이다[3-4]. 그림에서 알 수 있듯이 단결정 내부의 중성자속 분포는 상대적으로 균일하게 나타나지만 단결정 표면에서는 분포의 오르내림 폭이 상당히 크다.

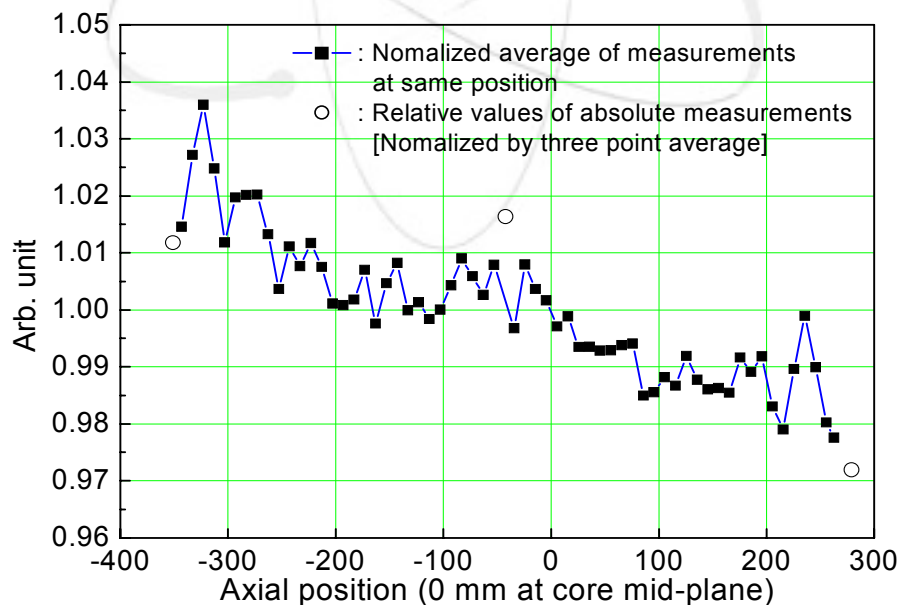


그림 3-9. 세 위치에 붙인 Au wire 측정값을 가중 평균한 결과.

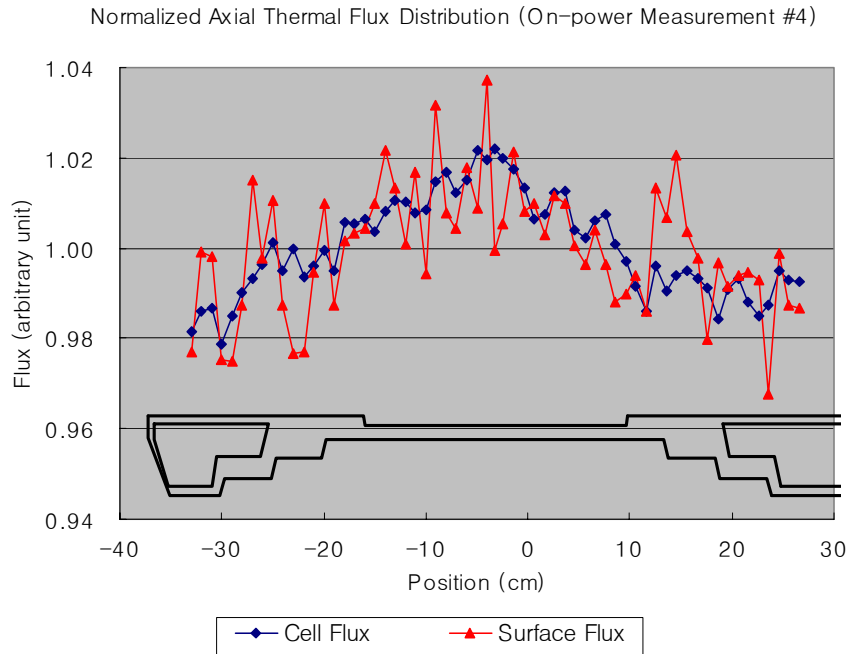


그림 3-10. 단결정 표면 및 내부 평균 중성자속 분포 비교 계산 결과.

이번에 실험에 이용한 단결정들은 직경과 길이 및 수직도 등의 조건이 하나로의 NTD 조사 기준에 크게 벗어난 단결정이었다. 그러나 위 실험 결과들을 살펴보면 이러한 경우의 단결정 조사시에도 중성자 조사량을 $\pm 2.5\%$ 이내로 유지할 수 있었다. 따라서, 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.

제 4 장 결 론

하나로에는 고순도 반도체 생산에 이용되는 중성자 변환 도핑(Neutron Transmutation Doping, NTD)을 위한 2개의 조사공이 있으며, 이를 이용한 NTD 연구가 진행되어 NTD2 조사공에서 조사를 수행할 수 있는 장치 및 기술 개발을 완료하고 test run을 수행하고 있다. 이러한 NTD 기술 개발의 핵심은 높은 중성자속을 유지하면서 중성자 조사량을 균일하게 유지하는 것이다. 본 연구에서는 다양한 계산을 통해 이러한 핵심 요건을 충족시킬 수 있는 조사 장치를 설계, 제작하였다. 이러한 계산의 신뢰성은 실험을 통해 검증되어야 하는데, 본 기술보고서는 NTD2 조사공의 여러 조건에 대한 절대 중성자속 및 중성자속 분포 측정을 통해 설계 검증을 수행하고, 이의 분석 및 보완 과정을 기술하고 있다.

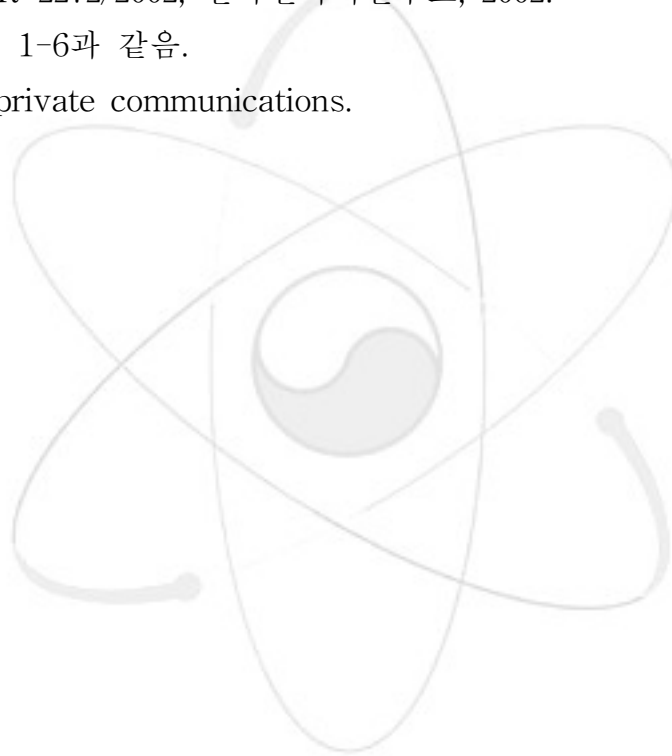
하나로 NTD2 조사공에서 제작된 조사 장치를 설치한 후 중성자속을 측정한 결과, 측정된 중성자속 분포와 설계에 사용된 MCNP 계산 결과가 잘 일치하였으므로 계산의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 제작된 조사통을 그대로 이용하여 측정한 경우, 중성자속 분포는 가운데 부분이 낮고 가장자리가 높게 측정되었으며, 측정값 사이의 차이는 7 %이내였다. 이에 따라 조사 장치를 보완하여 측정을 다시 수행하였으며, 중성자 조사량을 ± 2.5 %이내로 균일화 할 수 있었다. 또한 조사통 내부의 물 층 두께에 따른 조사량 변화 경향을 조사하였으며, 3 mm의 물층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다.

결론적으로, 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1-1. 전병진, “중성자 도핑”, 기술현황분석보고서, KAERI/AR-604/2001, 한국원자력연구소, 2001.
- 1-2. 김현준 외, “중성자 변환법에 의한 실리콘 도핑 기술 개발”, KAERI/RR-797/88, 한국원자력연구소, 1989.
- 1-3. 김현준 외, “중성자 빔 이용 재료 물성 연구”, KAERI/RR-1533/94, 한국원자력연구소, 1995.
- 1-4. 전병진 외, “NTD-Si의 방사능 예측”, 2000추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2000. 10.
- 1-5. 전병진 외, “하나로에서의 NTD 방안 분석”, 2000추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2000. 10.
- 1-6. 송영동 외, “하나로에서의 NTD 실현을 위한 조사 장치의 최적화 설계”, 2001추계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 2001. 10.
- 2-1. 참고문헌 1-1과 같은 책 p.21.
- 2-2. Handbook of Research Reactor Utilization, 2nd Rev., JAERI, March 1999, pp.187-205.
- 2-3. D. R. Cundy, et. al., “SIDONE - a new silicon irradiation facility in BR2”, Proc. Intl. Conf. on Irradiation Tech., May 1992, Saclay, France.
- 2-4. K. H. Nielsen, “New horizontal facility for neutron transmutation doping of silicon”, KAERI/GP-128/98, Proc. 6th Meet. IGORR, April 29-May 1, 1998, Taejon, Korea, pp.151-164.
- 2-5. Cross Section Evaluation Working Group, “ENDF/B-VI Summary Documentation”, Report BNL-NCS-17541 (ENDF-201) (1991), edited by P.F. Rose, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA. Downloading Data from INTERNET, <http://hpngp01.kaeri.re.kr/CoN/endlplot.shtml>.
- 2-6. *ibid.*
- 2-7. P.E. Schmidt and J. Vedde, “High Resistivity NTD- Production

- and Application”, Electrochemical Society Proceeding, Volume 98-13.
- 2-8. B.J. Jun, “Neutron Transmutation Doping”, RCA Regional Workshop/Training Course on Core Management for Improved Utilization of Research Reactors, May 13-24, 2002, Daejeon, Korea.
- 2-9. B.J. Jun, Y.D. Song, M.S. Kim and B.C. Lee, “Neutronic Design of Irradiation Device for Neutron Transmutation Doping in HANARO”, PHYSOR2002, October 7-10, 2002, Seoul, Korea.
- 3-1. 참고문헌 1-6과 같음.
- 3-2. 조영갑 외, “하나로 NTD 구동 장치 개발”, 기술보고서, KAERI/TR-2272/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- 3-3. 참고문헌 1-6과 같음.
- 3-4. 오수열, private communications.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-2508/2003					
제목/부제	실리콘 도핑을 위한 하나로 NTD2 조사공에서의 중성자속 분포 측정				
주 저 자	하나로운영부, 김 명 섭				
연 구 자 및 부 서 명	하나로운영부, 박 상 준, 임 경 환, 황 승 렬, 전 병 진				
출 판 지	대 전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2003
페 이 지	58 p.	도 표	있음(○), 없음()	크 기	21×29.7 cm ²
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), _ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약 번호		
초 록	<p>하나로 NTD2 조사공에서 조사 장치를 설치한 후 중성자속을 측정하였다. 중성자속 모니터로 Au wire를 붙여 NTD2 조사공에서 조사시켰으며, 조사 후 Au wire의 방사능을 감마 scanning 방법으로 측정하여 중성자속 분포를 결정하였다. 측정된 중성자속 분포와 설계에 사용된 MCNP 계산 결과가 잘 일치하였으므로 계산의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 제작된 조사통을 그대로 이용하여 측정한 경우, 중성자속 측방향 분포는 가운데 부분이 낮고 가장자리가 높게 측정되었으며, 위쪽이 아래쪽보다 높았다. 측정값 사이의 차이는 7 %이내였다. 이에 따라 조사 장치의 중성자 스크린에 알루미늄 wire를 감고 측정을 다시 수행하였으며, 중성자 조사량을 ±2.5 %이내로 균일화 할 수 있었다. 또한 조사통 내부의 물 층 두께에 따른 조사량 변화 경향을 조사하였으며, 3 mm의 물 층 두께 차이에 의해 최대 5.5 %의 조사량 차이가 발생하였다. 결론적으로, 현재 제작된 조사 장치를 이용하여 NTD를 수행할 수 있음을 확인하였다.</p>				
주제명 키워드	실리콘 도핑, 중성자속, 조사 장치, 중성자 스크린, 하나로 NTD2 조사공				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET											
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code					
KAERI/TR-2508/2003											
Title/ Subtitle		Measurements of Neutron Flux Distribution in NTD2 Irradiation Hole of HANARO for Silicon Doping									
Main Author		HANARO Management Division, Myong-Seop KIM									
Researcher and Department		HANARO Management Division, S.J. Park, K.H. Lim, S.Y. Hwang, B.J. Jun									
Publication Place		Taejon		Publisher		KAERI		Publication Year		2000	
Page		58 p.		Ill. & Tab.		Yes(○), No()		Size		21×29.7 cm ²	
Note											
Classified		Open(○), Restricted(), _ Class Document				Report Type		Technical Report			
Performing Organization						Contract No.					
Abstract		<p>The neutron flux is measured in the HANARO NTD2 irradiation hole after installing the irradiation facility. The Au wires, which are neutron flux monitors, are irradiated in the NTD2 irradiation hole. The radioactivity of irradiated Au wire is measured by gamma scanning method, and the neutron flux distribution is determined. The measured neutron flux distribution is very similar to the result of MCNP calculation used in the design of irradiation facility, so, the reliability of design calculation is verified. In the measurements with the fabricated irradiation tube without any modification, the neutron flux near the center of irradiated area is lower than that of edge, and the flux of upper region is higher than that of lower region. The deviation between the measurements is within 7 %. So, the Al wire is wound round the neutron screen, and the flux is measured again. The neutron irradiation can be flattened within ±2.5 %. Also, the variation of neutron irradiation according to the thickness of water gap inside of irradiation tube is investigated, and the maximum difference of 5.5 % is occurred from the thickness of water gap of 3 mm. Conclusively, it is confirmed that the NTD service can be performed using the present irradiation facility.</p>									
Subject Keywords		Silicon Doping, neutron flux, irradiation facility, neutron screen, HANARO NTD2 irradiation hole									