

중성자 supermirror V-bender 특성 평가

Characterization of Neutron Supermirror V-bender

KAERI

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2004 년도 “분광기술고도화 및 응용기술개발”과제의 “중성자 supermirror V-bender 특성 평가” 기술보고서로 제출합니다.



2004. 5.

주 저 자 : 신 은 주
공 저 자 : 성 백 석
이 정 수
홍 광 표
최 병 훈
이 창 희

요 약 문

I. 제 목

중성자 supermirror V-bender 특성 평가

II. 연구 개발의 목적 및 내용

국내 유일의 고출력 중성자원인 연구용 원자로 하나로(HANARO, 열 출력 30MW)에는 중성자빔 이용 실험을 위한 7개의 수평 실험공이 준비되어 있으며, 이중 6개의 수평 실험공에 상호 보완적인 중성자 실험장치들을 단계적으로 설치하여, 물리, 원자력, 재료과학, 화학, 생명공학, 요업 등의 광범위한 연구 분야의 기초 및 응용연구를 수행할 수 있는 연구 기반을 구축하고 있다. 아울러 하나로는 높은 냉중성자속(cold neutron flux)을 얻기 위한 냉중성자원(cold neutron source)과 중성자 유도관(neutron guide tube), 냉중성자 산란장치 등 관련 실험 설비들도 단계적으로 설치할 예정이다. 이러한 실험 설비가 구축되면 하나로는 국가거대시설로서 중성자 빔을 이용한 생명공학기술(BT), 정보기술(IT), 나노기술(NT), 우주과학기술(ST) 등 광범위한 연구 분야에서 기초 및 응용 연구 센터로서의 역할을 수행할 것이다.

본 보고서에서는 냉중성자원 설치 시에 주요 핵심 기술의 하나인 중성자 유도관(guide)과 중성자 supermirror의 기본원리 및 응용현황에 대해서 소개하고, 하나로 SANS 장치에 활용하기 위해서 제작한 중성자 supermirror V-bender의 중성자 특성 평가 결과를 기술하였다.

III. 연구개발 결과 및 활용 계획

중성자 supermirror는 중성자를 손실 없이 수십 미터까지 유도할 수 있는 중성자 유도관, 중성자 빔을 분리하거나 또는 방향을 바꾸어 주는 중성자 bender 등의 제작에 이용된다. 이러한 장치들은 첨단 중성자 분광장치의 핵심 부품 중의 하나이다. 중성자 supermirror로 제작된 중성자 V-bender의 중성자 빔 특성 평가 기술을 확립하였으며, 이 기술은 후일 냉중성자원 개발 및 첨단 중성자분광장치 개발에 이용될 것이다.

SUMMARY

I. Project Title

Charaterization of Neutron Supermirror V-bender

II. Objective and Contents of the Project

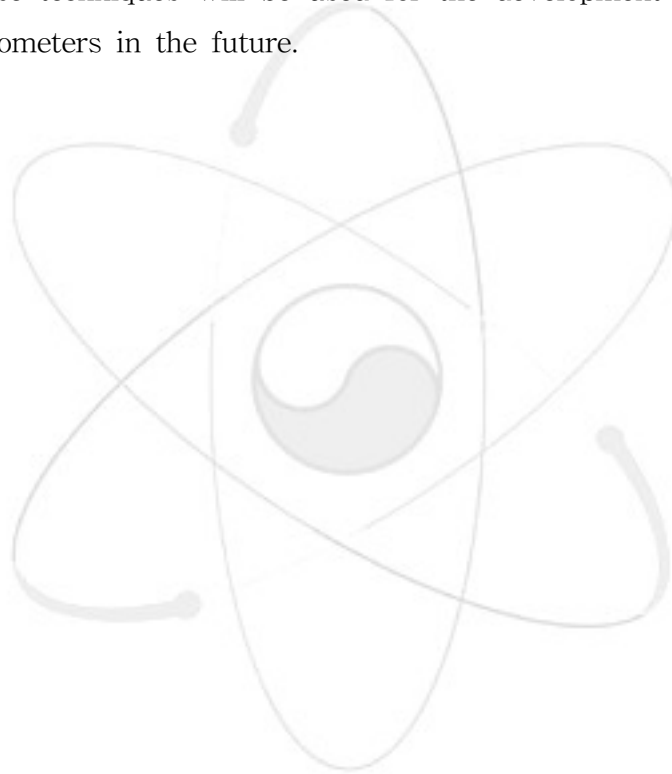
HANARO reactor with maximum thermal power of 30MW at KAERI is the multi-purpose research reactor for the application of reactor radiation in variety of fields such as physics, nuclear power plant, materials science, bio-science, etc. For the neutron beam research, six horizontal beam tubes of different types are available. Various and complementary neutron scattering facilities are developed and installed around HANARO reactor to contribute towards solving a wide rage of problem involving basic and applied researches.

Liquid hydrogen cold neutron source will also be equipped at CNS vertical hole of HANARO reactor, and neutron guide tubes and a number of cold neutron scattering facilities such as small angle neutron spectrometer, triple axis spectrometer, etc., will be developed in stages. When above facilities will be installed completely, HANARO as a national neutron beam research center will have a major important role to support a wide range of fundamental research as well as technological development in various research fields such as bio-technology(BT), information technology(IT), nano-technology(NT), radiation technology(RT), etc.

Neutron supermirror V-bender was fabricated for the purpose of using neutron filter of small angle neutron spectrometer, and the performance test on the neutron beam of CN beam tube was carried out. In this report, the basic principles and applications of neutron guide tube and neutron supermirror as well as the performance test results of neutron V-bender were introduced.

III. Result of Project

Neutron supermirror is used not only for neutron guide tubes that their make it possible to transmit neutrons for long distance with low losses in intensity but for neutron benders used as a beam splitter. These devices are of main components of advanced neutron diffractometer or spectrometer with cold neutrons. As the characterization techniques of HANARO supermirror V-bender on neutron beam and the process of performance tests are developed, these techniques will be used for the development of advance cold neutron spectrometers in the future.



CONTENTS

Chapter I. Introduction	10
Chapter II. Principles of neutron guide tube	11
Section 1. Reflection of neutron mirror	11
Section 2. Principles of neutron guide	13
1. Straight neutron guide	14
2. Curved neutron guide	17
3. Multichannel neutron guide	21
Chapter III. Application of multilayer mirrors	23
Section 1. Development of supermirror	25
Section 2. Application of Ni/Ti supermirror	29
Section 3. Application of polarizing supermirror	33
Chapter IV. Development of HANARO supermirror V-bender	36
Section 1. Introduction	36
Section 2. Fabrication of V-bender	37
Section 3. Result and Discussion	44
Chapter V. Result	60
References	61

목 차

제 1 장 서 론	10
제 2 장 중성자 유도관의 원리	11
제 1 절 거울 표면에 의한 반사	11
제 2 절 중성자 guide 원리	13
1. 직선형(straight) 중성자 guide	14
2. 곡선형(curved) 중성자 guide	17
3. 다중 슬릿(multichannel) 중성자 guide	21
제 3 장 다층 거울 이용기술	23
제 1 절 Supermirror의 개발 현황	25
제 2 절 Ni/Ti supermirror의 응용	29
제 3 절 Polarizing mirror의 응용	33
제 4 장 하나로 V-bender 개발	36
제 1 절 개요	36
제 2 절 하나로 V-bender 제작	37
제 3 절 실험 및 결과	44
1. V-bender 투과 빔의 이탈 각(angular deviation, β) 측정	44
2. 입사 빔 collimation에 따른 V-bender 투과 효과	51
3. Bender의 투과율 측정	53
제 5 장 결 론	60
참 고 문 헌	61

표 목 차

표 2.1 물질의 고유 성질인 단위 파장 당 임계각	12
표 3.1 Loss mechanism of a supermirror($m=2$) having a design reflectivity $R_d = 99.3\%$, r_s is the roughness of the float glass.	27

그 립 목 차

그림 2.1 The variation of reflectivity in the neighbourhood of critical reflection calculated from eqn.(3) for a critical glancing angle of $10'$	13
그림 2.2 Diagrams (a),(b) indicate how total internal reflection of neutrons in a collimating tube may increase the angular divergence of the emerging neutrons from $\pm\alpha$ up to $\pm\theta_c$, where θ_c is the critical angle. Diagram (c) shows how in a bent tube the neutron beam, proceeding by reflection at the tube walls, emerges free from contamination by fast neutrons.	14
그림 2.3 중성자 유도관의 설치 개념도	16
그림 2.4 Ni supermirror($m=3$, $\gamma_c = 0.1^\circ$) guide의 길이 $L = 4$ m, 폭 $H = H_s = 60$ mm, $L_s = 2$ m 인 구조에서 반사율이 1.0, 0.9 및 0.5일 때의 투과 이득 비교 평가	16
그림 2.5 A schematic view of a neutron guide channel	18
그림 2.6 The transmittance of a perfect neutron guide for an incident neutron beam of divergence $D=2\theta_*$ as a function of the relative wavelength λ/λ_*	20
그림 2.7 A scheme of two similar neutron guides(their characteristic angles are the same and equal to θ_*)	20
그림 2.8 A general view of a polarizing multichannel neutron guide.	22
그림 3.1 Reflectivity of a supermirror composed of 900 layers Ni/Ti. The solid line represents a fit to the data using the roughness $r_s \sim 11.5 \text{ \AA}$ of the interfaces as adjustable parameter. The principle of a supermirror is shown on the right. The thin layers are responsible for the	

	reflection of neutrons at large angles	25
그림 3.2	Dependence of the number of layers on the critical angle of reflection. The dramatic increase of N with increasing Θ_c indicates that four times Θ_{Ni} might be a technological limit. The number of layers is approximately given by $N=4m^4$	26
그림 3.3	Transmission profile of a micro-guide having a gap of 0.8 mm and a length of 500 mm. The supermirror coating($R_d=99.3\%$) is composed of 40 bi-layers Ni-N-O/Ti yielding a reflectivity of 94% at $m=2$ for $\lambda=4 \text{ \AA}$	27
그림 3.4	Reflectivity of a polarizing supermirror.	28
그림 3.5	Calculated flux at the end of a 54 m long neutron guide at SINQ. For $\lambda > 2 \text{ \AA}$ ($E_i < 20 \text{ meV}$) the neutron guide is more efficient than a beam tube.	30
그림 3.6	The experimental reflectivity of a Ni/Ti supermirror on glass as a function of the perpendicular wavelength.	30
그림 3.7	Reflectivity of an $m=4$ supermirror on float glass.	31
그림 3.8	Trumpet type supermirror	31
그림 3.9	Anti-trumpet type supermirror	32
그림 3.10	The measured reflectivity of Remnant supermirror	34
그림 3.11	Experimental reflectivities for spin-up neutrons and the polarizing efficiency of CoFe/TiZr supermirror with a TiZrGd anti-reflective underlayer produced in PNPI are given as a function of the perpendicular wavelength.	35
그림 4.1	하나로 SANS 장치의 V-bender 개략도	37
그림 4.2	하나로 V-bender 제작도면	38
그림 4.3	V-bender의 중성자 반사각	39
그림 4.4	여러 파장의 중성자 빔에 대한 V-bender 투과 빔의 각도 분포 및 강도	40
그림 4.5	입사 빔과 V-bender 투과 빔의 이론적 위치와 강도	41
그림 4.6	중성자 bender channel의 geometry를 검사하기 위한 X-ray reflectometer	41
그림 4.7	X-ray 빔에 의한 V-bender 검사 개략도	42

그림 4.8	V-bender section 1의 각각 다른 channel에 대해서 다른 y 위치에서 측정된 X-ray 반사 빔의 이탈 각도(angular deviation)를 나타내는 분포 함수 $f(\phi)$	43
그림 4.9	중성자 파장에 대한 V-bender의 이론적인 투과율 곡선	44
그림 4.10	V-bender의 중성자 경로	45
그림 4.11	백색 중성자 빔에 대한 V-bender 투과 빔의 측정 결과	46
그림 4.12	백색 중성자 빔에 대한 V-bender 투과 빔의 이론적 계산 결과	47
그림 4.13	위성 피크를 만드는 중성자의 입사각도	48
그림 4.14	입사 빔 파장에 따른 V-bender 투과 빔의 비교	49
그림 4.15	CN 빔 중심선으로부터 V-bender 투과 빔의 위치	50
그림 4.16	파장 4.74Å, 분산각 $\sim 0.035^\circ$ 의 입사 빔에 대하여 측정된 V-bender 투과 빔의 각도 분포	51
그림 4.17	파장 4.71Å의 입사 빔에 대해 이론적으로 계산한 V-bender 투과 빔의 각도 분포	52
그림 4.18	TOF법으로 측정된 CN 빔 스펙트럼과 V-bender 투과빔 스펙트럼	54
그림 4.19	TOF법으로 측정된 CN 빔 스펙트럼과 V-bender 투과빔 스펙트럼의 channel 및 background 보정	54
그림 4.20	TOF법으로 측정된 V-bender 투과율	55
그림 4.21	PG 단색화 빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자 빔의 파장 분포 : Be 10 cm 설치	56
그림 4.22	PG 단색화 빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자 빔 파장 분포의 거리 및 background 보정 : Be 10cm 설치	56
그림 4.23	PG 단색화 빔을 이용하여 측정된 V-bender 투과율 : 빔 포트에 10cm-Be 장전시 실험 값과 이론 값 비교	57
그림 4.24	PG 단색화 빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자 빔의 파장 분포 : Be 10cm와 Bi 20cm 설치	57
그림 4.25	PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자빔 파장 분포의 거리 및 background 보정 : Be 10cm와 Bi 20cm	58
그림 4.26	PG 단색화 빔으로 측정된 V-bender 투과율	58
그림 4.27	PG 단색화 빔을 이용하여 V-bender 후단에서 측정된 중성자 빔 파장 분포	59

제 1 장 서 론

국내 유일의 고출력 중성자원인 연구용 원자로 하나로(HANARO, 열 출력 30MW)는 지난 95년 2월에 첫 임계에 도달된 후에 단계적인 출력운전 시험을 거쳐 현재 설계 출력의 약 80% 수준인 24MW로 운전되고 있으며, 2004년 중순 경에는 전 출력 운전이 기대되고 있다. 하나로에는 중성자 빔 이용 실험을 위한 7개의 수평 실험공이 준비되어 있으며, 이중 6개의 수평 실험공에 상호 보완적인 중성자 실험장치들을 단계적으로 설치하여, 물리, 원자력, 재료과학, 화학, 생명공학, 요업 등의 광범위한 연구 분야의 기초 및 응용연구를 수행할 수 있는 연구 기반을 구축하고 있다.

현재에는 고분해능 분말 회절장치(High Resolution Neutron Powder Diffractometer, HRPD), 중성자 투과 비파괴 검사장치(Neutron Radiography Facility, NRF), 4축 단결정 회절장치(Four Circle Diffractometer, FCD), 중성자 소각산란 분광장치(Small Angle Neutron Spectrometer, SANS)가 설치되어 운영 중에 있다. 또한 편극 중성자 분광장치(Polarized Neutron Spectrometer, PNS)와 중성자 반사율 측정장치(Neutron Reflectometer, REF)의 개발이 거의 마무리 단계이고, 3축 중성자 분광장치(Triple Axis Spectrometer, TAS)의 개발이 이루어지고 있다. 아울러 2003년 7월부터 하나로에는 냉중성자원(cold neutron source)과 냉중성자 분광장치의 개발이 진행되고 있다. 이들 장치가 단계적으로 설치되면 하나로를 범 국가적 중성자 빔 이용 연구 센터로서 활용할 예정이다.

선진 연구소에서는 중급 또는 고출력의 원자로에 냉중성자원을 설치하고, 중성자 유도관(neutron guide tube)과 중성자 supermirror 기술을 접목하여 고성능의 냉중성자 분광장치들을 개발, 설치함으로써, 생명공학기술(BT), 정보기술(IT), 나노기술(NT), 우주과학기술(ST) 등의 광범위한 연구 분야에서 기초 및 응용 연구를 지원함으로써 연구로의 활용을 극대화하고 있다.

하나로에서도 중성자소각산란분광장치에 활용할 목적으로 제작된 중성자 supermirror의 중성자 빔 특성을 평가를 수행함으로써 중성자 supermirror 이용 기술을 습득하였다. 본 보고서에서는 냉중성자원 설치 시에 주요 핵심 기술이 되는 중성자 유도관과 중성자 supermirror의 기본 원리 및 응용현황에 대해서 소개하고, 하나로 SANS 장치에 활용하기 위해서 제작한 중성자 supermirror V-bender의 중성자 빔 특성 평가 결과를 기술하기로 한다.

제 2 장 중성자 유도관의 원리

중성자 유도관(neutron guide tube)은 원자로에서 나오는 중성자들을 가능한 한 중성자속의 손실 없이 수십 미터 떨어져 있는 중성자 분광장치로 유도하는 장치이다. 이것은 섬유질의 광케이블에서 빛이 이동하는 방법과 동일한 것으로서, 중성자들이 유도관 내부에 코팅(coating)된 중성자 거울(mirror)에 의해 반사되면서 이동하게 되어 있다. 전 세계적으로 대부분 냉중성자원에는 수십 미터에 달하는 중성자 유도관이 설치되어 있고 한 개의 유도관 채널에 2~4개의 각종 중성자 분광장치가 설치되어 있다. 최근까지 유도관은 유리(glass)에 단일 필름을 코팅한 중성자 거울을 사용하여 중성자를 전반사(total reflection)시키는 방법을 사용하고 있으며, 이러한 코팅 재료로는 중성자 산란거리(b)가 크고, 원자 밀도(n)가 높아서 중성자 산란밀도($\rho=nb$)가 큰 즉, 큰 임계 각을 갖는 Ni를 주로 이용하고 있다. 따라서 유도관에서 거울의 물리적 특성과 기하학적 구조는 중성자 유도관의 성능을 좌우하게 된다. 본 절에서는 중성자 거울의 특성을 본격적으로 논의하기 전에 중성자 유도관에서의 일반적인 광학적 원리를 논의하기로 한다.

제 1 절 거울 표면에 의한 반사

중성자 유도관의 기본 원리는, 유리(glass)와 같은 유도관 재료에 Ti/Ni 같은 물질을 굴곡이 없이 부드럽게 코팅하여 만든 거울에 의해서 중성자들이 전반사(total internal reflection) 하도록 하는 것이다. 중성자들에 대한 거울의 굴절률(refractive index)은

$$n = 1 - \frac{\lambda^2 N \bar{b}}{2\pi} \quad (1)$$

이며[1,2], 여기서 N은 반사물질에서의 단위 부피 당 원자핵 수(cm^{-3}), \bar{b} 는 평균 간섭성 산란거리(bound coherent scattering amplitude)이다. 즉 반사 물질 내에 다양한 원자들이 존재하고 원자들의 수가 N_r 이라면 $N\bar{b} = \sum N_r \bar{b}_r$ 로 주어진다. 또한 Ti, V, Mn 등과 같은 몇 개의 원소를 제외하고는 대부분의 원소들에 대해서 \bar{b} 의 부호가 양수이므로 굴절률은 1 보다 작은 값을 갖는다. 대부분의 물질에서 \bar{b} 값은 통상 10^{-12} cm 보다 작고, N도 7×10^{22} cm^{-3} 의 값을 가지므로 열중성자

($\lambda = 1.8\text{\AA}$)들에 대한 $1-n$ 값은 대략 10^{-5} 정도의 값을 갖는다. 대부분 물질에서 굴절률은 1 보다도 약간 작으므로 중성자의 반사는, 공기이나 진공처럼 밀도가 낮은 물질에서 밀도가 높은 물질로 이동할 때는 단지 입사 각(glancing angle)이 임계 각 보다 작을 때만 일어난다. 이러한 전반사에 대한 임계 각(critical angle)은

$$\theta_c = \lambda \sqrt{\frac{N\bar{b}}{\pi}} = \lambda \gamma_c \quad (2)$$

로 주어지며, 물질의 고유값인 단위파장 당 임계각 γ_c ($^\circ/\text{\AA}$)는 물질내의 단위 부피당 원자수(N)와 평균 간섭성 산란거리(\bar{b})로부터 구할 수 있다. 즉, 중성자 유도관의 투과율을 높이려면 간섭성 산란거리가 가능한 큰 거울 물질을 선택해야 함을 알 수 있다. 예를 들어 천연 Ni 표면에서는 $\gamma_c = 1.7 \text{ mrad}(5.96\text{min})/\text{\AA}$, Cu 및 유리에 대해서 γ_c 는 각각 $1.4 \text{ mrad}(4.87\text{min})/\text{\AA}$ 및 $1.1 \text{ mrad}(4.46\text{min})/\text{\AA}$ 의 값을 가지므로 중성자 mirror 물질로 Ni이 많이 쓰이는 이유이다. 표 2.1에는 다양한 재료들에 대한 γ_c 의 값을 요약하였다.

표 2.1 물질의 고유 성질인 단위 파장당 임계각(γ_c)

Materials	γ_c (min/ \AA)	Materials	γ_c (min/ \AA)
Nickel	5.96	Copper	4.87
⁵⁸ Ni	7.07	Iron	5.68
Glass	4.46	Cobalt	3.0
Aluminium	2.95	⁵⁸ Ni(SM)	11.69
Graphite	5.63		

중성자 거울 표면이 굴곡이 없이 완벽하다면 임계각(θ_c)보다 작은 각(θ)으로 빔이 입사하는 경우에 반사율은 1이 되나, 입사각이 임계 각보다 클 경우에는 비록 완벽한 표면이라고 할지라도 반사율은 다음 식에 의해서 급격히 감소하게 된다.[1,2]

$$R = \left[\frac{(n^2 - \cos^2\theta)^{1/2} - \sin\theta}{(n^2 - \cos^2\theta)^{1/2} + \sin\theta} \right]^2 \quad (3)$$

$$\approx \left[\frac{1 - [1 - (\theta_c/\theta)^2]^{1/2}}{1 + [1 - (\theta_c/\theta)^2]^{1/2}} \right]^2$$

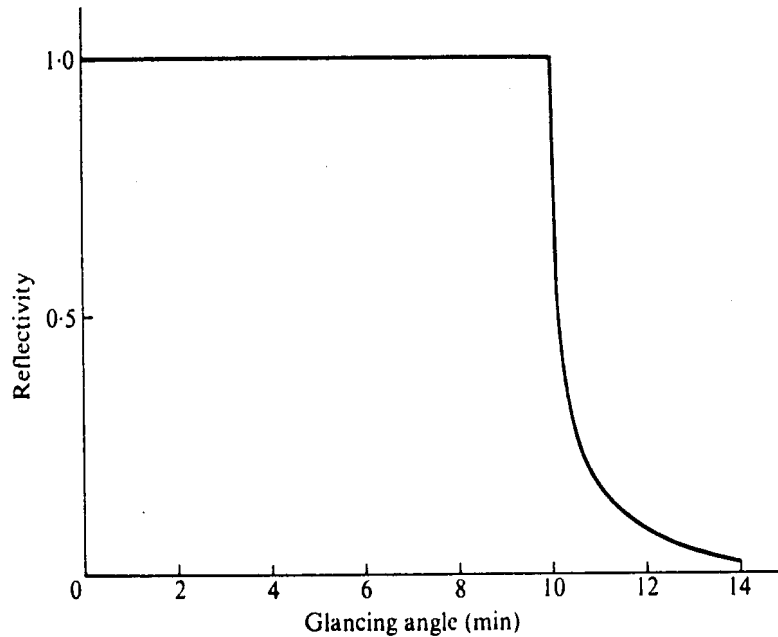


그림 2.1 The variation of reflectivity in the neighbourhood of critical reflection calculated from eqn.(3) for a critical glancing angle of 10'

그림 2.1은 임계 각이 10' 일 때 식(3)의 반사율을 임사각의 함수로 나타낸 것이며, 임계각 이후에서 반사율이 급격하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 반사율은 임계각 이후의 반사율 값이 0이 되는 계단(step)함수로 근사할 수 있다(이와 같은 근사는 실제 중성자 유도관의 투과율을 모사(simulation) 하는데 이용된다). 식(3)으로 주어진 반사율은 임계각 이하에서는 물질 내에서의 다중산란(multiple scattering)현상에 의한 것이며, 실제 거울의 반사율은 원재료의 기본적인 결함과 코팅(coating) 과정에서 발생하는 여러 가지 결함 때문에 정확히 1이 될 수 없으며, 이에 대해서는 뒤에서 다시 논의하기로 한다.

제 2 절 중성자 유도관의 원리

그림 2.2는 위와 같은 중성자 거울의 반사율을 이용하여 만든 직선형(straight) 및 곡선형(curved) 중성자 유도관의 개념도를 보인 것이다. 이들 유도관의 가장 중요한 특성은 파장에 따른 중성자 투과율이며, 이것은 유도관의 기하

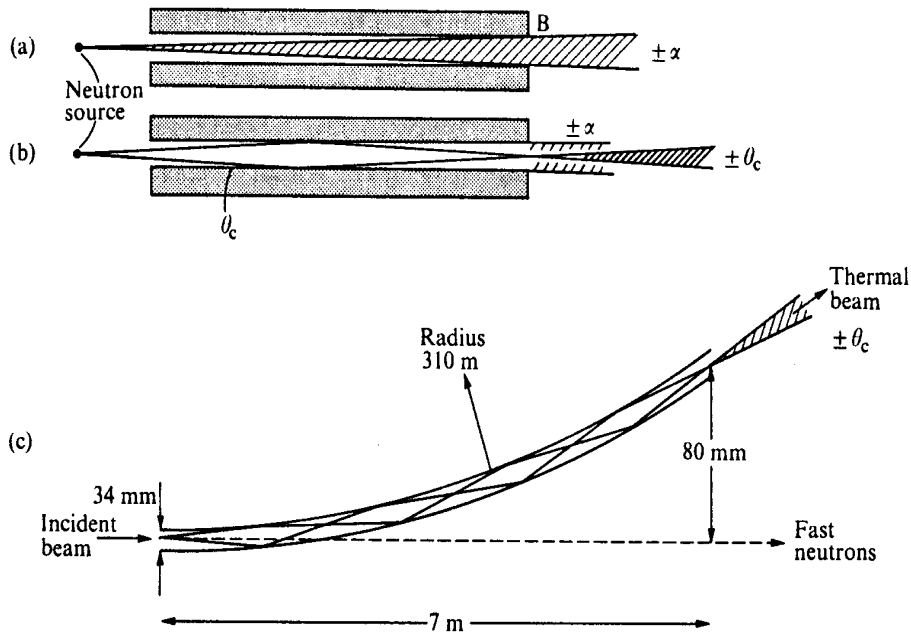


그림 2.3 Diagrams (a),(b) indicate how total internal reflection of neutrons in a collimating tube may increase the angular divergence of the emerging neutrons from $\pm\alpha$ up to $\pm\theta_c$, where θ_c is the critical angle. Diagram (c) shows how in a bent tube the neutron beam, proceeding by reflection at the tube walls, emerges free from contamination by fast neutrons.

학적 구조와 거울의 반사율에 밀접한 관계가 있다. 여기서는 이들 효과에 대해서 논의하기 위해 근사적인 유도관 구조에 대해서 해석적인 방법으로 유도관의 투과율을 계산하고 이를 Ray-tracing 방법으로 모사(simulation)한 결과를 비교 검토함으로써 중성자 유도관의 개념을 이해하고자 하였다.

1. 직선형(straight) 중성자 유도관

직선형 유도관은 내부 표면에 중성자가 전반사 할 수 있도록 Ni/Ti 같은 재료를 코팅하여 거울을 만들고, 이를 직사각형으로 만들어 4 방향에서 중성자가 산란하도록 하여 중성자의 투과 손실을 최소화하는 것이다. 이러한 유도관에서 그림 2.2(a)에서처럼 중성자 거울 없이 투과되는 중성자 강도는 이 유도관에 의한 입체각(solid angle)에 비례하며, 거울이 존재하는 경우에는 그림 2.2(b)에서처럼 거울의 전반사 효과에 의한 추가적인 투과 중성자가 존재한다. 따라서 이러한

유도관을 투과한 중성자 속은 거울의 입계각에 의한 효과와 거울이 없는 단순한 유도관에 의한 투과 효과가 존재하므로, 중성자 유도관의 거울에 의한 투과 이득(gain)은[3]

$$\text{Gain}(\theta_c) = \frac{\text{Mirror가 있을때 투과 중성자수}}{\text{Mirror가 없을때 투과 중성자수}} \quad (4)$$

로 표시할 수 있다.

중성자원이 유도관의 입구에 가까이 있다면, 유도관을 투과하는 중성자 강도는 거울이 없을 때와 있을 때, 각각

$$\begin{aligned} \text{(i) 반사없음} \quad I(\theta_c) &\propto a^2 \\ \text{(ii) 반사존재} \quad I(\theta_c) &\propto \begin{cases} (a^2 + \theta_c^2), & 0 < \theta_c \leq a \\ 2a\theta_c, & \theta_c \geq a \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

로 주어지며, 식(4)에 의한 유도관의 투과 이득(gain)은 다음과 같다.

$$\text{Gain}(\theta_c) \propto \begin{cases} 1 + \frac{\theta_c^2}{a^2}, & 0 < \theta_c \leq a \\ \frac{2\theta_c}{a}, & \theta_c \geq a \end{cases} \quad (6)$$

여기서 a 는 유도관의 분산(divergence)각이다. 그러나 실제 원자로 중성자 빔 포트에서 중성자 직선 유도관의 설치를 고려하면, 유도관의 입구는 그림 2.3에서처럼 중성자원(cold source 또는 beam tube nose)으로부터 거리 L_s ($\ll L$)만큼 떨어져 있고, 중성자원의 폭(H_s)은 유도관의 폭보다도 다소 큰 구조를 가지고 있다. 이러한 경우에 유도관의 투과 이득은 매우 복잡한 식을 보이나, $H = H_s$ 인 경우에 입계각(θ_c)이 입사빔의 분산각 $H/(L_s+L)$ 와 같을 때는 식(4)의 이득(gain)은 $1 + L/(L+L_s)$ 의 값을 갖고, 입사빔의 분산각이 H/L_s 보다 클 때의 중성자 투과 이득은 $1 + L/L_s$ 의 값을 갖는다고 알려져 있다. 그림 2.4에는 유도관 길이 $L = 4$ m, 폭 $H = H_s = 60$ mm, $L_s = 2$ m 인 유도관 구조를 갖고 Ni supermirror($m=3$, $\gamma_c = 0.1^\circ$)의 반사율이 1.0, 0.9 및 0.5인 조건에 대해서 Ray-tracing 투과법을 사용하여 식(4)와 식(6)에 따른 유도관 투과 이득을 계산하여 비교하였다. 이 결과에 의하면 반사율인 $R=1.0$ 일 때 파장 5.7\AA 이상에서 계산된 이득은 약 3배로서 이는 위의 해석적인 결과와 잘 일치하는 것을 알 수

있다. 반사율 $R < 1.0$ 이하일 때 이득이 낮아지는 이유는 중성자들이 유도관을 따라 이동할 때에 거울에서 다중 반사하므로, 거울의 반사율에 따른 중성자 흡수효과가 나타났기 때문이다. 예를 들어, 길이가 L , 폭이 H 인 1차원 유도관에서 중성자들이 투과할 때, 임계각 θ_c 에서 중성자들이 반사되는 최대 수는[2]

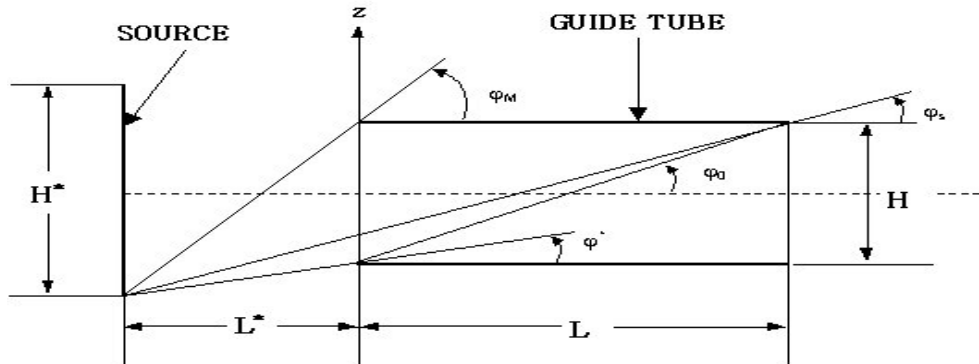


그림 2.4 중성자 유도관의 설치 개념도

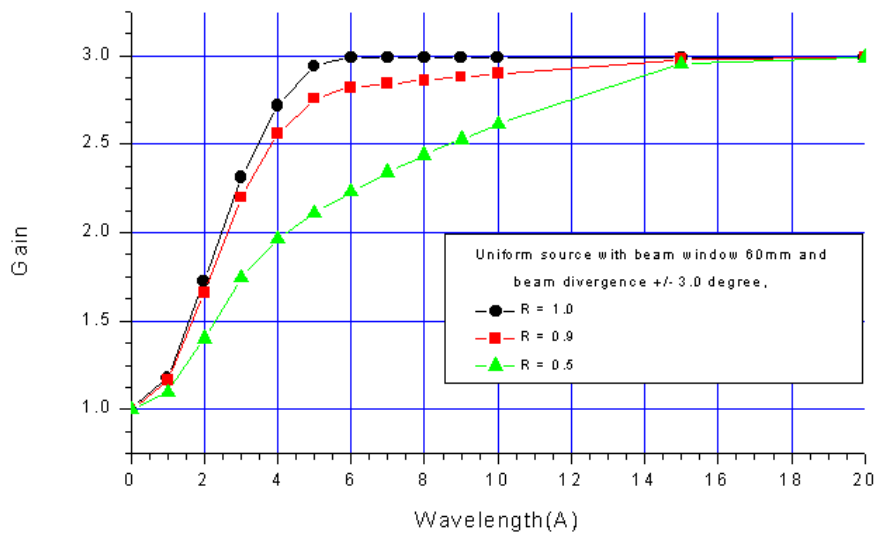


그림 2.4 Ni supermirror($m=3$, $\gamma_c = 0.1^\circ$) guide의 길이 $L = 4$ m, 폭 $H = H_s = 60$ mm, $L_s = 2$ m 인 구조에서 반사율이 1.0, 0.9 및 0.5일 때의 투과 이득 비교 평가

$$n_{\max} = \frac{L\theta_c}{H} \quad (7)$$

이며, 평균 반사되는 수는

$$\bar{n} = \frac{L\theta_c}{2H} \quad (8)$$

이다. 따라서 일반적으로 장파장인 경우 임계각이 커짐에 따라 반사수도 증가되므로 반사율이 1인 경우를 제외하면 중성자 투과 손실은 다음과 같다.

$$P = 1 - R^{\bar{n}} \quad (9)$$

즉, 이러한 투과강도 손실은 거울의 반사율이 아무리 좋다고 하더라도 필연적으로 생기는 손실이다. 예를 들어 $R = 0.98$ 인 Ni 거울로 코팅된, $L = 10$ m, $H = 60$ mm인 유도관을 중성자가 이동한다고 할 때, 파장 4\AA 은 거울에서의 평균 반사 수는 식(8)에 의해서 33번이며, 투과 손실은 약 49%이다. 즉 중성자 유도관의 투과율을 향상시키려면 반사율이 좋은 거울을 선정해야하며, 또한 유도관을 가능한 중성자원에 가까이 설치해야 한다. 위의 계산은 단순히 거울의 좌우 양면만을 고려한 것으로 실제 유도관의 투과율은 거울 좌우 양면에 의한 투과 이득 외에 거울 상하 면에 의한 투과 이득도 함께 고려해야 되므로 실제 이득은 위의 보다 더 크게 나타날 것이다.

2. 곡선형(curved) 중성자 유도관

곡선형 유도관은 길이가 작은 직선 유도관을 연속적으로 배열하여 그림 2.2(c)에서처럼 일정한 곡률 반경을 갖도록 하여, 일정한 조건의 중성자만 투과되어 직선 빔에서 방향을 바뀌도록 하는 것이다. 이러한 곡선형 유도관은 직선형 유도관보다는 투과율이 떨어지지만 중성자 분광장치에서 시료위치를 원자로에서 직접 나오는 감마선 및 속중성자의 빔 방향으로부터 벗어나게 하여 중성자 배경 산란(background)을 줄일 수 있는 장점이 있기 때문에 열 및 냉중성자 중성자 유도관으로 널리 이용되고 있다.

곡선형 중성자 유도관의 기하학적 인자들을 그림 2.5에 설명하였다. a 는 굴곡된 거울들 사이의 채널 폭, L_1 은 bent 채널에서 빔이 직선으로 투과할 수 없는 최소 거리, ρ 는 유도관의 곡률 반경, θ_* 는 곡선형 유도관의 특성 각(characteristic angle)이다. 이 특성 각이 작으면 곡선형 중성자 유도관의 기하학적 인자들은 다음과 같이 단순화할 수 있다.[4,5]

$$a = \frac{L_1 \theta_*}{4} \tag{10}$$

$$\rho = \frac{L_1}{2\theta_*} = \frac{L_1^2}{8a}$$

곡선형 중성자 유도관에서의 또 다른 중요한 인자는 특성파장(characteristic wavelength) λ^* 로 이는 특성각, θ_* 와 mirror의 단위 파장당의 입계각 γ_c 에 관계한다.

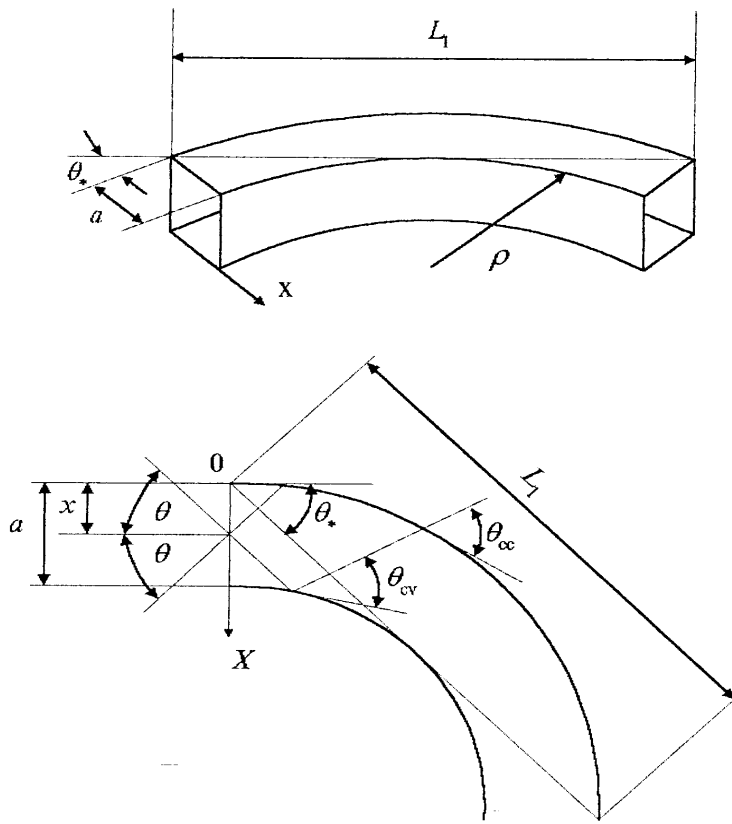


그림 2.5 A schematic view of a neutron guide channel

즉

$$\lambda^* = \frac{\theta_*}{\gamma_c} \tag{11}$$

곡선형 중성자 유도관에서의 중성자 궤적은 그림 2.5에서 보인 것처럼 유도

관 입구에서의 입사각 θ 와 위치 x 에 의해서 결정된다. 유도관의 오목(concave)한 면과 볼록(convex)한 면에서 반사되는 중성자에 대한 입사각(glancing angle)은 각각

$$\begin{aligned}\theta_{cc} &= \sqrt{\left(\frac{\theta}{\theta_*}\right)^2 + \frac{x}{y_c}} \\ \theta_{cv} &= \sqrt{\left(\frac{\theta}{\theta_*}\right)^2 + \frac{x}{y_c}} - 1\end{aligned}\quad (12)$$

로 주어진다. 파장 λ 를 갖는 중성자들이 유도관을 따라 투과하기 위해서는 입사각(glancing angle)은 임계각 λy_c 보다 작아야 한다. 또한 식 (12)에서 $\theta_{cc} \geq \theta_{cv}$ 이므로 중성자가 투과할 조건은 다음과 같다.

$$\theta_{cc} \leq \lambda y_c \quad (13)$$

즉, 파장 λ 인 중성자가 유도관을 따라 투과할 각도, θ_1 은

$$\theta_1 \leq \theta_* \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda_*}\right)^2 - \frac{x}{y_c}} \quad (14)$$

와 같으며, 곡선형 중성자 유도관 출구에서의 중성자 강도는 각 중성자 파장에 대해 $2\theta_1$ 에 비례한다.

곡선형 중성자 유도관에 입사하는 중성자 강도를 I_{in} 이고 출구에서의 강도를 I_{ex} 라 하면 유도관의 투과율은

$$T(\lambda) = \frac{I_{ex}(\lambda)}{I_{in}(\lambda)} \quad (15)$$

로 주어지며, 이는 중성자 유도관의 계수와 입사 빔의 분산(divergence)각에 의해서 결정된다. 그림 2.6은 입사 중성자 빔의 분산이 $D=2\theta_*$ 일 때 완벽한(perfect) 중성자 유도관의 투과율을 상대 파장 λ/λ_* 의 함수로 나타낸 것이다. 파장이 λ^* 보다 큰 경우에는 유도관의 거울 면으로부터 잘 반사되고, 잘 투과되므로 투과율은 파장에 따라 증가한다. 이와 반대로 파장이 λ^* 보다 작은 경우에는 파장이 감소함에 따라 투과율은 급격하게 감소한다. 만약에 곡선형 유도관에서 동일한 거울 임계각($\alpha_1=\alpha_2$)과 동일한 특성 각($\theta_{*1}=\theta_{*2}$)을 갖는 유도관이라면 식(11), (13) 및 그림 7로부터 spectral transmission은 동일한 값을 갖는다. 그림 2.7 에서처럼 2개의 유도관이 동일한 특성 각(characteristic angle) θ_* 을 갖고, 유도관 채널 폭, 직선 빔 길이(direct view length) 및 곡률 반경을 각각 a_1, L_1, ρ_1 및 a_2, L_2, ρ_2 라 하자. 식 (10)에 의해서

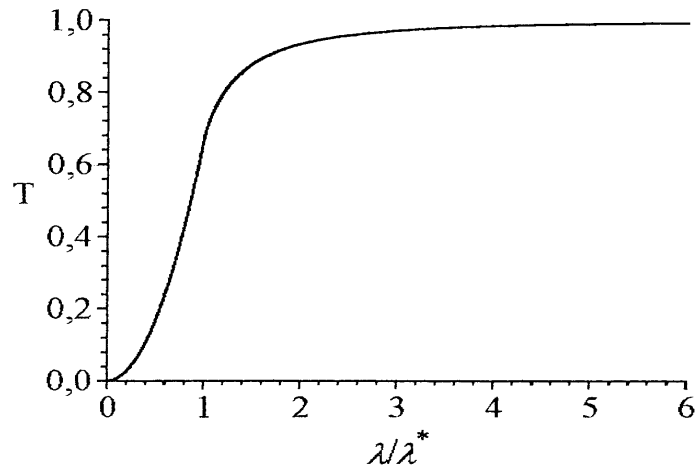


그림 2.6 The transmittance of a perfect neutron guide for an incident neutron beam of divergence $D=2\theta_*$ as a function of the relative wavelength λ/λ_*

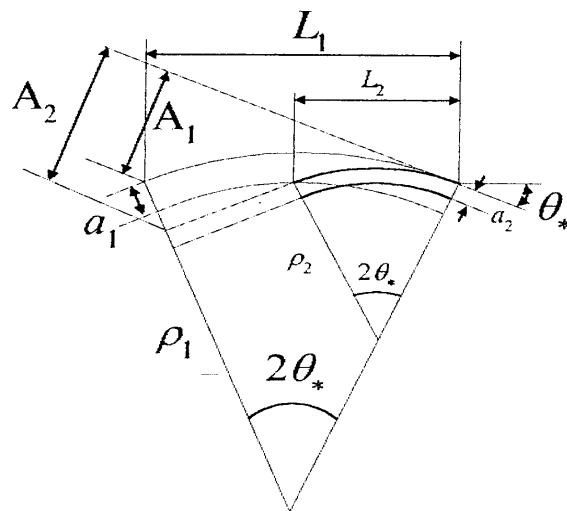


그림 2.7 A scheme of two similar neutron guides (their characteristic angles are the same and equal to θ_*)

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (16)$$

을 얻을 수 있으며, 직선 빔 길이는 채널 폭에 비례해서 감소한다. 즉, 동일한 특성의 곡선형 유도관을 얻기 위해서 유도관 길이를 줄일 수 있으며, 이 경우에는 유도관 폭을 함께 줄여야 하는 단점이 있다. 따라서 넓은 빔을 사용하기 위해서는 채널 수를 증가해야 하며, 이것이 다중 채널 굴곡기(bender)의 원리이다. 또한 이러한 굴곡기를 빔을 분리하기 위한 분리기(splitter)로 사용할 때는 그림 2.7 에서처럼 입사 빔 축에서부터 거리 L_1 만큼 떨어져 있는 위치에서의 투과 빔의 선형 편차 A_1 및 A_2 를 고려하는 것이 중요하다. 즉

$$A_1 = L_1\theta_*$$

$$A_2 = L_2\theta_* + (L_1 - L_2)2\theta_*$$

이며, $L_1 \gg L_2$ 이라면

$$A_2 = 2L_1\theta_* \quad (17)$$

을 얻을 수 있다. 이것은 동일한 특성각(θ_*)과 동일한 특성 파장(λ^*)을 갖는 2개의 굴곡기를 이용하면 하나의 빔을 공간적으로 2개로 분리할 수 있음을 보여준다.

3. 다중 슬릿(multichannel) 중성자 유도관

동일한 특성을 갖는 유도관을 다양한 길이로 만들 수 있으며 식 (16)에 의하면 길이를 줄이면 슬릿 폭은 줄여야 함을 알 수 있다. 즉 길이 $L_1 = 50\text{m}$, 폭(a_1) 5cm 인 유도관과 동일한 특성을 갖는 길이 $L_2 = 1\text{m}$ 인 유도관을 만든다면 유도관 폭은 0.1cm 가 되어야 한다. 이러한 원리는 길이가 1m 이내인 마이크로 유도관(microguide)를 제작할 수 있게 하며, 보다 넓은 빔을 사용하기 위해서는 마이크로 유도관을 겹쳐서 다중 슬릿 유도관(또는 굴곡기)를 만들 수 있다. 그러나 다중 슬릿 굴곡기의 단점은 Ti/Ni 등을 코팅할 유리 기판(glass substrate)을 아주 얇게 만들 수 없기 때문에 단일 슬릿 유도관보다도 기본적으로 투과율이 현저하게 낮아진다. 즉 기판(substrate)의 두께를 δ , 채널 폭을 a 라하며, 굴곡기 구조에 의한 기본적인 투과율은

$$K_g = \frac{a}{a + \delta} \quad (18)$$

로서, 기본적으로 구조에 의한 투과손실이 발생하며, 이외에 단일 거울 유도관에

서의 투과율을 고려해야한다. 다중 슬릿 중성자 유도관(또는 굴곡기)은 통상 길이가 약 1m 이며, 최근에는 길이를 50cm까지 줄인 마이크로유도관(microguide)을 사용하고 있다. 이러한 다중슬릿 유도관은 실험목적에 따라서 다양한 구조를 가지나 직선빔의 방향을 바꿀 목적으로 원형의 거울로 만들거나 또는 평행한 거울을 V-자 모양으로 만들어(V-굴곡기(bender))를 사용하고 있다. 또한 유도관이 단순히 원자로 빔으로부터 열 또는 냉중성자를 유도하거나 빔을 분리하기 위한 목적이라면, Ni/Ti supermirror를 사용하나, 만약 거울을 Co/Ti 또는 CoFe/TiZr 등과 같은 편극 supermirror를 사용하는 경우에는 중성자 유도관을 편극(polarizing) 할 수 있으므로, 이들은 편극 중성자 분광장치들에서 중성자 편극기(polarizer)나 또는 시료에서 산란된 중성자의 편극 해석기(polarizing analyzer)로 사용한다.

그림 2.8은 편극 다중 채널 유도관의 개략도를 보인 것으로 편극 거울(polarizing mirror)들을 포화(saturation) 하기 위한 자장계(magnetic system)만 없다면 일반적인 non-polarizing 중성자 유도관과 동일한 구조를 갖는다. 이것은 supermirror를 코팅한 1mm보다 얇은 glass substrate(1)들 사이에 spacer(2)를 끼우고, 이를 프레임(3)을 이용하여 밀착시키며, 이를 고정하여 채널의 굴곡을 결정한다. 이러한 장치 전체를 자장계(magnetic system)에 놓는다. 이러한 특성의 supermirror에 대해서는 다음절에 좀더 자세히 논의하기로 한다.

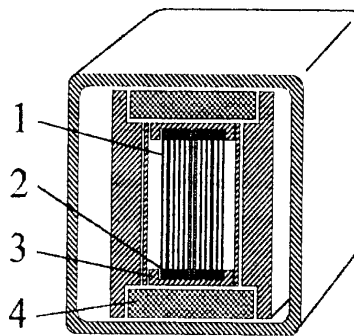


Fig. 2.8 A general view of a polarizing multichannel neutron guide. 1. Polarizing mirrors on thin glass substrates. 2. Steel spacers. 3. Metal frame. 4. Magnetic system.

제 3 장 다층거울(multilayer mirror(supermirror)) 이용 기술

위에서 설명한 것과 같이 중성자 유도관은 중성자원으로부터 멀리 떨어져 있는 중성자 분광장치까지 중성자를 전달하는데 매우 효과적인 방법이며, 전세계적으로 대부분 냉중성자원에는 수십 미터에 달하는 중성자 유도관을 설치하고 한 개의 유도관 채널에 2 ~ 4개의 각종 중성자 분광장치를 설치하고 있다. 최근까지의 유도관은 유리(glass)에 단일 필름을 코팅한 중성자 거울을 사용하여 중성자를 전 반사시켜 이동시키는 방법을 사용하였으며, 이러한 코팅 재료로는 중성자 산란거리(b)가 크고, 높은 원자 밀도(n)를 가지고 있어 중성자 산란밀도($\rho = nb$)가 커서 큰 임계각을 가진 Ni를 주로 이용하고 있다. Ni은 산란밀도 $\rho = 9.41 \times 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$, 임계각 $\theta_c^{Ni}/\lambda = \gamma_c = (\rho/\pi)^{1/2} = 1.73 \text{ mrad/\AA} (0.099^\circ/\text{\AA})$ 의 값을 갖는다. 그러나 실제 실험에서는 Ni의 임계각도 다소 작기 때문에 투과되는 중성자 빔의 분산(divergence)도 이에 의해 제한을 받게 되므로, 투과율이 낮은 열중성자에서 보다는 파장이 큰 냉중성자들에 대해서는 매우 효과적이었다. 그러나 파장이 짧은 열중성자 영역에서도 유도관의 중성자 투과율을 높이기 위한 노력이 진행 중이며, 이는 임계각을 증가시키는 것으로 해결 할 수 있다. 일찍이 Mezei는 두 개의 다른 물질(Ni/Ti)로 구성된 판막(한 쌍의 두께 = d)을 그림 3.1과 같이 교대로 d를 단조롭게(monotonically) 변화하도록 코팅함으로써 임계각을 증가시킬 수 있다고 제한하였다. 이러한 코팅을 통상 supermirror이라고 알려져 있으며, 중성자 산란은 이러한 층상 구조(layer structure)에 의한 Bragg 법칙,

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad n=1,2,3,\dots \quad (19)$$

을 만족한다. 만약 두 물질의 두께가 같고($d = 2a$), 두 물질의 경계면 들에서 산란 강도도 완만하게 sine 함수 모양으로 변한다면, 단지 1차 Bragg 반사만 존재한다. 또한 Bragg 반사각이 거울의 임계각과 같다면, $\theta_c = \lambda(\frac{1}{2d}) = \lambda \gamma_c$ 의 관계식을 얻을 수 있으며, Ni 경우 $\gamma_c = 1.73 \text{ mrad/\AA}$ 임으로 이에 대응되는 layer의 두께 $2d$ 는 약 580 \AA 이다. 또한 Bragg 반사각이 임계각의 2배($m=2$), 즉 $\theta = \lambda(\frac{1}{2d}) = \lambda 2\gamma_c$ 라면 $2d$ 는 약 290 \AA 의 값을 갖는다. 이것은 $\theta_c \geq \theta$ 인 조건, 즉 전반사가 일어날 조건은 $2d$ 가 580 \AA 보다 커야되므로 코팅의 두께도 최소한

580Å 이상 되어야 한다. 여기서 설명을 위해 파장과 입사각(glancing angle)과 관련된 수직파장, $\lambda_{\perp} = \lambda/\theta = 2d$ 라 정의하자. 즉 전체적으로 Ni의 특정 파장 ($\lambda_{\text{cNi}} = 1/\gamma_{\text{c}}$)보다 큰 수직파장 ($\lambda_{\perp} > \lambda_{\text{cNi}} = 580 \text{ \AA}$)를 갖는 중성자들은 전 반사하며(보통 Ti/Ni supermirror에서 최대 두께는 약 700Å 이상으로 되는 것으로 알려져 있다.), 일련의 Ti과 Ni 층상구조는 수직파장 $\lambda_{\perp} < 580 \text{ \AA}$ 을 갖는 중성자들에 대해서만 Bragg 반사를 함을 알 수 있다. 임의의 Ti과 Ni이 이루는 한 쌍의 층상구조에 의해서 반사하는 중성자들의 수직파장은

$$\lambda_{\perp} = 2d_{\text{Ni}} n_{\text{Ni}} + 2d_{\text{Ti}} n_{\text{Ti}} \quad (20)$$

을 갖는 것으로 밝혀졌으며[5,6], 여기서 d_{Ni} 와 d_{Ti} , n_{Ni} 와 n_{Ti} 는 각각 Ni와 Ti의 두께와 굴절 지수이다. 위에서 설명한 것처럼 임계각(Bragg 반사각)이 Ni의 임계각보다 2배($m=2$)인 Ni/Ti supermirror이라 하면, 이 각에서의 수직파장 λ_{\perp} 은 약 290Å이다. 즉 이러한 supermirror에서의 반사율은 Ni의 특성 수직파장 ($\lambda_{\text{cNi}} = 580 \text{ \AA}$)으로부터 supermirror 특성 수직파장 [$\lambda_{\text{cSM}} = \lambda_{\text{cNi}}/m (=2)$]에 이르는 영역에서의 반사율과 전 반사율이 함께 고려되어야 한다. 여기서 m 은 Ni의 임계각에 대한 supermirror 임계 각의 증가계수이다.

또한 층(layer)들을 CoFe, Co, Fe 등의 magnetic 물질과 TiZr, Ti 및 Al 등의 non-magnetic 물질을 교대로 코팅함으로써 반사각이 또한 spin에 의존하게 만들 수 있으므로, supermirror을 중성자 polarizer 및 analyzer로 사용할 수 있다. 이 경우에는 주로 낮은 파장, 즉 열중성자 영역에서의 실험이 요구되므로 중성자 투과율을 높이기 위해 가능한 m 이 큰(임계각이 큰) supermirror을 사용해야 하며, 유도관의 길이도 1m 이하가 되어야 한다.

Supermirror의 성능은 임계각($\theta_c = m(\lambda\gamma_c)$)에서 반사율이 1로부터 얼마나 벗어나느냐에 의해서 결정되며, 이들은 코팅 물질간 접촉면의 완벽성에 밀접한 관련되어 있다. 일반적으로 높은 반사율을 얻기 위해서는 코팅 두께가 보통 20Å 이하가 되도록 해야함으로 substrate를 매우 평평하게 만들고, 또한 inter-diffusion과 interface roughness를 가능한 최소화해야 한다. 스위스 PSI, 러시아 PNPI 등의 세계의 여러 연구실에서 이러한 목표를 달성하기 위하여 서로 다른 기술을 이용하여 supermirror을 경쟁적으로 개발 중에 있다.[5,7-10] 현재로는 Pulsed DC-magnetron sputtering 법이 가장 좋은 방법 중의 하나로 알려져 있으며, 이는 넓은 면적에서도 재연성 있게 균일한 질량의 반듯한 층상 구조를 만들 수 있기 때문이다. 다음에는 supermirror의 개발 및 응용 현황을 파악하여

supermirror를 설계하거나 사용할 때의 고려해야될 문제점을 이해하기로 한다.

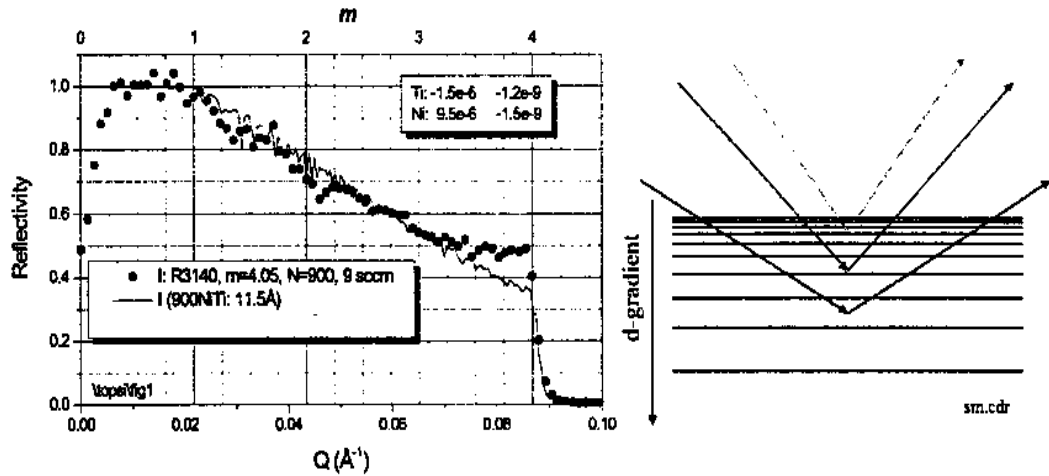


그림 3.1 Reflectivity of a supermirror composed of 900 layers Ni/Ti. The solid line represents a fit to the data using the roughness $r_s \sim 11.5 \text{ \AA}$ of the interfaces as adjustable parameter. The principle of a supermirror is shown on the right. The thin layers are responsible for the reflection of neutrons at large angles

제 1 절 supermirror의 개발 현황

중성자 유도관에 사용되는 multilayer는 보통 두 물질간의 산란대비 (scattering contrast)가 큰 Ni과 Ti 재료를 사용한다. 따라서 큰 임계각을 원하는 것이 아니라면 비교적 적은 수의 layer로 만들어진 supermirror에 의해서도 높은 반사율을 얻을 수 있음을 그림 3.2에 나타내었다.[11] 이 그림은 Hayter와 Mook에 의해서 개발된 논리를 이용하여, 즉 두 물질의 산란거리 밀도, 설계 반사율 R_d 및 layer의 수 N 의 상관관계식에서 임계각과 코팅할 Ni/Ti layer수와의 관계를 나타낸 것이다. Ni의 임계 각(θ_c^M)보다도 m 배 이상 임계 각(θ_c)을 늘리기 위해서 필요한 layer의 수는 근사적으로 $4m^4$ 가 된다고 하였다. 즉 $m=4$ 일 때는 layer 수를 최소한 1,000층 이상 되어야 함을 의미한다. 이것이 현재 중성자 거울 코팅 기술의 한계라고 하며, m 의 수를 최대한 늘리려는 노력이 계속되고 있다.

그러나 불행하게도 Ni/Ti supermirror인 경우에 코팅 과정에서 온도를 증가시킬 때에 inter-diffusion이 발생하여 경계 면이 rough하게 되는 원인이 되어, 더 이상 임계 각을 확장할 수 없게 되었으며, 이러한 효과를 줄이기 위해 Ni 층

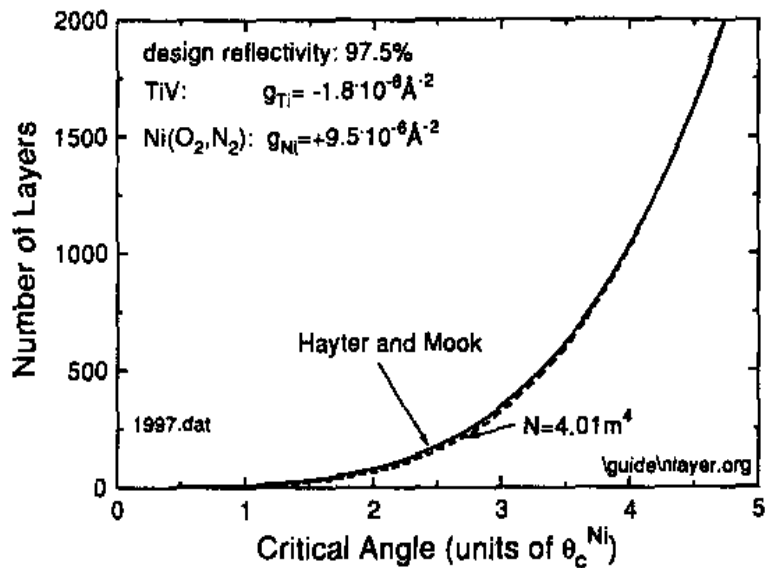


그림 3.2 Dependence of the number of layers on the critical angle of reflection. The dramatic increase of N with increasing Θ_c indicates that four times Θ_c^{Ni} might be a technological limit. The number of layers is approximately given by $N=4m^4$

에 C를 첨가하는 것이 일반화되어 있다. 이 방법은 C가 각 층들을 비정질화시킬 뿐만 아니라 산란대비를 증가시키고, 또한 inter-diffusion을 방지하는 효과가 있다고 알려져 있다.[12-14]

NiC_x/Ti으로 구성된 이 supermirror도 기술의 한계와 경제적 이유로 개발이 중단되었으며, Ni과 Ti의 산란대비를 증가시키기 위해 Ni 층에는 O와 N을 첨가하고 Ti 층에는 약 16%의 V가 함유된 Ti-V합금을 사용하는 supermirror가 PSI 연구실에서 개발되었다.[15] 이 supermirror에서의 N은 Ni 층에서 산란대비를 증가시키고 또한 그레인 크기(grain size)를 감소시키는 역할을 하며, O는 Ti와 반응하여 TiO₂를 만들어 경계 면에서 얇은 diffusion 막이 형성되도록 한다. 또한 V는 Ti의 집합조직을 증가시켜 Ti 층에서의 roughness를 감소시켜, supermirror의 성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 이 supermirror (microguide)의 설계된 반사율은 임계 각 $\theta_c = m\theta_c^{Ni} (m=2)$ 일 때 99.3%이었으나 측정된 반사율(R)은 그림 3.3에 보인 것처럼 약 94%로 차이가 있음을 알 수 있

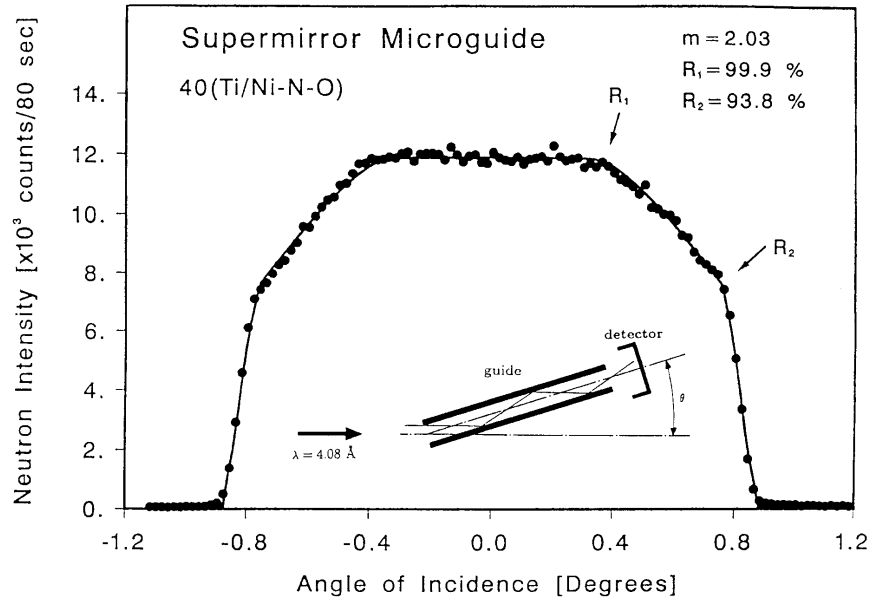


Fig. 3.3 Transmission profile of a micro-guide having a gap of 0.8 mm and a length of 500 mm. The supermirror coating ($R_d=99.3\%$) is composed of 40 bilayers Ni-N-O/Ti yielding a reflectivity of 94% at $m=2$ for $\lambda=4 \text{ \AA}$.

다.[16] 표 3.1에는 이러한 반사율 차이를 이해하기 위하여 손실 인자들을 정리하였다. 이 표에 의하면 물질의 흡수와 비간섭 산란에 기인하는 손실은 substrate의 표면 roughness와 비슷한 손실을 보이고 있으며, 나머지 손실 $\Delta_{sm} = 2.6\%$ 는 대부분은 layer의 두께가 감소할 때에 보다 중요하게 작용하는 layer들 사이의 inter-diffusion에 기인한 것이다.[17] 따라서 supermirror의 제조 방법이 반사율 향상에 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

표 3.1. Loss mechanism of a supermirror($m=2$) having a design reflectivity $R_d = 99.3\%$, r_s is the roughness of the float glass.

Mechanism		R/loss
Absorption	Δ_a	0.7%
Incoherent scattering	Δ_i	0.7%
$r_s \sim 3.7 \text{ \AA}$	Δ_s^f	$\sim 1.3\%$
$R_c = R_d - \Delta_a - \Delta_i - \Delta_s^f$	R_c	96.6%
Measured reflectivity	$R_{exp}(\max)$	$94.0 \pm 0.5\%$
Difference : $\Delta_{sm} = R_c - R_{exp}(\max)$	Δ_{sm}	$2.6 \pm 0.5\%$

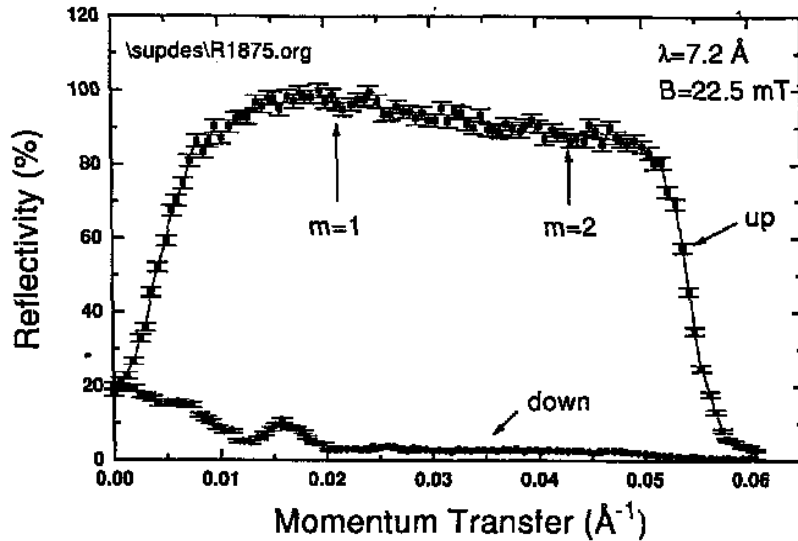


그림 3.4 Reflectivity of a polarizing supermirror. The polarization is of the order of 0.93 and has not been corrected for the finite polarization of the neutron beam.

또한 polarizing supermirror와 monochromator를 제작하기 위해서도 inter-diffusion 및 roughness를 줄이기 위한 노력이 진행중이다. 특히 magnetic $Fe_{50}Co_{48}V_2$ 와 TiN_x 을 조합한 supermirror는 좋은 성능을 보이고 있다. 이는 Ti를 sputtering 하는 동안 N_2 의 압력을 단순히 조정하는 방법으로 $Fe_{50}Co_{48}V_2$ 의 산란거리 밀도에 TiN_x 의 산란거리밀도를 적절히 조절함으로써, 최적의 반사율을 얻을 수 있다. 이 supermirror는 spin-up state에서는 완전히 투과하고, spin-down state에서는 완전히 반사시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 3.4는 PSI에서 제작한 Julich의 TOF 분광장치, DAS에서 사용되는 $m=2.4$ 인 polarizing mirror의 반사율을 예로서 보인 것이다.[18-19]

현재의 기술은 $m=2$ 정도의 supermirror는 layer 구조 결함에 의한 반사율 손실이 substrate의 roughness 또는 waviness에 기인한 손실과 비슷하게 제조할 수 있을 정도로 발달되어 있으며, 그 동안 여러 연구소에서 Ni을 코팅한 중성자 유도관을 supermirror 유도관(guide)으로 교체하였으며, 스위스의 SINQ spallation source에서는 단지 한 개의 유도관 만을 제외하고는 모두 supermirror 유도관을 사용하고 있다.

Supermirror 개발의 현재 경향은 주로 중성자 속을 향상시키기 위해서 m 이 보다 큰 supermirror를 개발 중에 있다. 이러한 m 이 큰 supermirror는 시료 위치에서 약 5배정도 중성자속을 증가시킬 수 있는 focussing anti-trumpet supermirror의 구현과 열중성자 유도관을 제조할 수 있게 하였다. 그러나 이와 같이 m 이 큰 supermirror는 높은 반사율을 얻을 수 있음에도 불구하고 층상구조에 발달한 stress는 supermirror의 수명을 단축하는 중요한 요인으로 이에 대한 연구도 진행중이다. 또한 polarizing 해석을 위해서는 열중성자에 대해서 투과율과 polarizer의 빔 투과 공간을 증가시켜야 하며, 이는 m 이 큰 supermirror를 이용하여 얻을 수 있다. m 을 증가시키는 노력외에 magnetic layer의 stress를 조정하여, mirror들이 remanet가 되도록 하는 것으로, 이는 spin-selective devices 처럼 자장이 없는 곳에서도 사용할 수 있는 장점이 있다. 이와 같은 큰 m 을 가진 supermirror를 개발하는데 있어서 중요한 문제인 layers에서의 stress와 interface에서의 roughness를 최적화하고, polarizing mirror의 magnetic 작용에 대한 stress 영향을 연구하고 있다.

제 2 절 Ni/Ti supermirror의 응용

앞서 설명하였듯이 $m=2$ 인 supermirror는 비교적 넓은 면적의 거울도 쉽게 만들 수 있으며 반사율도 90% 이상 되며, 가격도 저렴하게 만들 수 있다. supermirror의 성능 평가의 한 예로서 그림 3.5에는 PSI의 SING에 설치된, 반사율 $R=88\%$ 이고 길이가 54m인 곡선형(곡률반경 $R=2063m$) supermirror guide에서 출구를 통과하는 중성자속 분포를 계산하고, 빔 tube 선단에서 약 6m 거리에 중성자 분광장치가 있다고 가정한 경우의 중성자속 분포와 비교하였다.

Supermirror를 통과한 중성자속 분포는 Ni를 코팅한 일반 guide($m=1$)를 통과한 중성자속 분포보다도 열중성자 쪽으로 이동하였으며, 파장 약 4\AA 근처에서의 중성자속도 약 3배정도 증가함을 알 수 있다. 또한 낮은 파장 영역에서의 투과 중성자속의 증가로 같은 크기의 빔 단면적을 갖는 빔 tube에서처럼 넓은 열중성자 영역의 파장을 이용할 수 있으며, guide에서 signal-to-noise 비가 현저하게 좋아짐을 알 수 있다.

위와 같이 원자로에서 나오는 직선 빔을 피하기 위한 방법으로서의 또 하나는 중성자 multichannel bender를 사용하는 것이다. 이것은 앞서서 설명한바와 같이 좁은 공간에서 직선 빔의 방향을 틀어야 하는데 이용된다. 이러한 목적으로 러시아 PNPI에서 하나로 SANS 장치의 $m=2$ 인 Ni/Ti supermirror V-bender를 제작

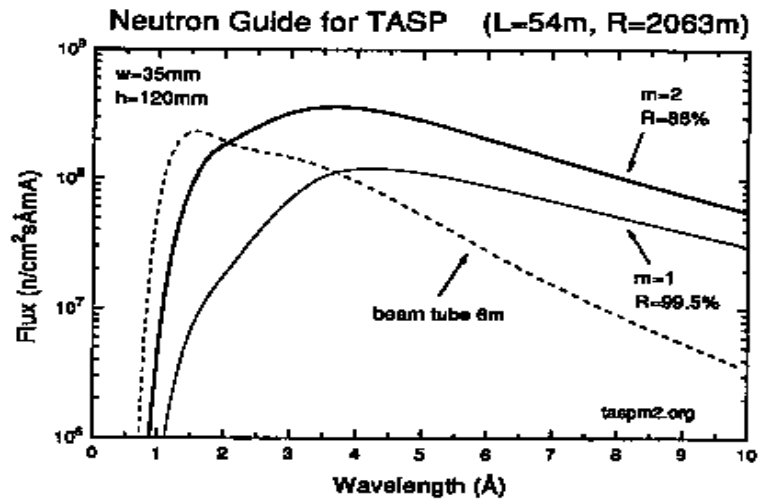


그림 3.5 Calculated flux at the end of a 54 m long neutron guide at SINQ. For $\lambda > 2 \text{\AA}$ ($E_i < 20 \text{ meV}$) the neutron guide is more efficient than a beam tube.

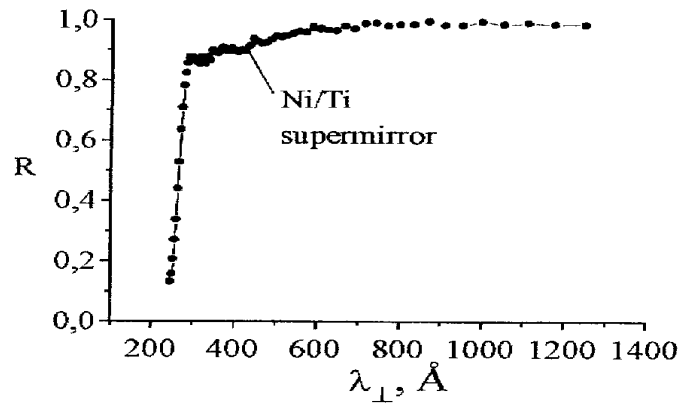


그림 3.6 The experimental reflectivity of a Ni/Ti supermirror on glass as a function of the perpendicular wavelength.

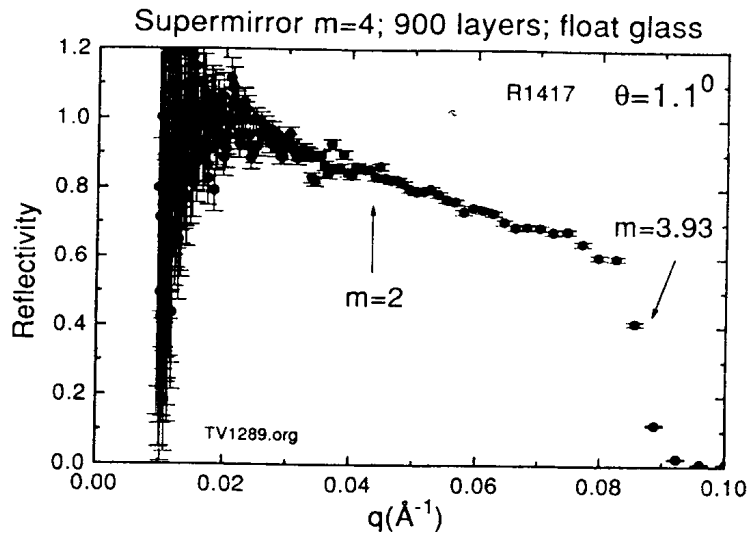


그림 3.7 Reflectivity of an $m=4$ supermirror on float glass. the total thickness of the coating is $4.5 \mu\text{m}$

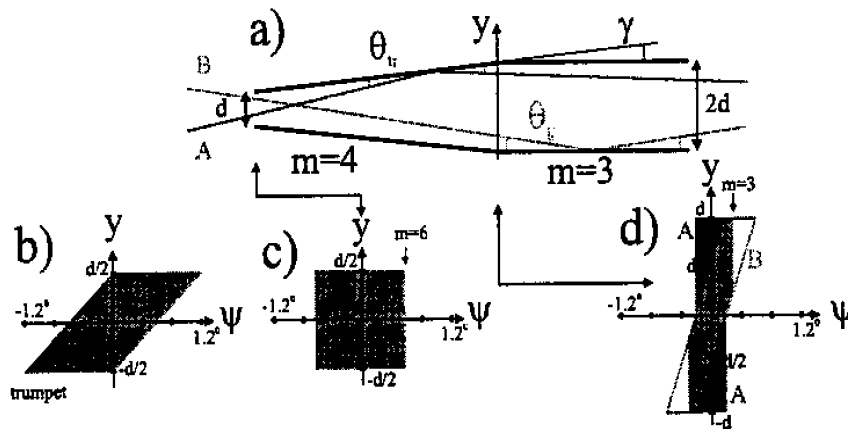


그림 3.8 Trumpet type supermirror

하였다. 이것은 통상의 곡선형(curved) bender와 다르게 400mm의 평면 supermirror($\gamma_c = 3.3 \text{ mrad}/\text{\AA}$, 반사율 $R \sim 0.9$)를 각도 약 23 mrad되게 V-자형으로 만든 multichannel bender이다. 이에 대해서는 뒤에서 자세히 논의하기로 한다. 이 supermirror의 실험 반사율을 그림 3.6에 수직과장의 함수로서 나타내었다.

최근에는 PSI에서는 mirror의 층수(N)를 $m=2$ 의 82개에서 $N=900$ 층으로 단순히 증가시킴으로써 $m \simeq 4\theta_c^{Ni}$ 의 supermirror를 만들었으며, 그림 3.7에는 이 supermirror의 측정반사율을 나타내었다. $m=2$ 에서는 아직도 $R=86\%$ 의 반사율을 보이나 $m=4$ 근처에서는 거의 직선으로 $R=60\%$ 까지 떨어짐을 알 수 있다. 여기에서 약 20%의 반사율 손실은 주로 interface roughness에 기인한 것이다. 그러나 이 supermirror의 총 두께가 $d = 4.5\mu\text{m}$ 임을 감안할 때 표면 roughness는 단지 $r_s \sim 10\text{\AA}$ 이며 이는 d 의 약 0.02%이다.

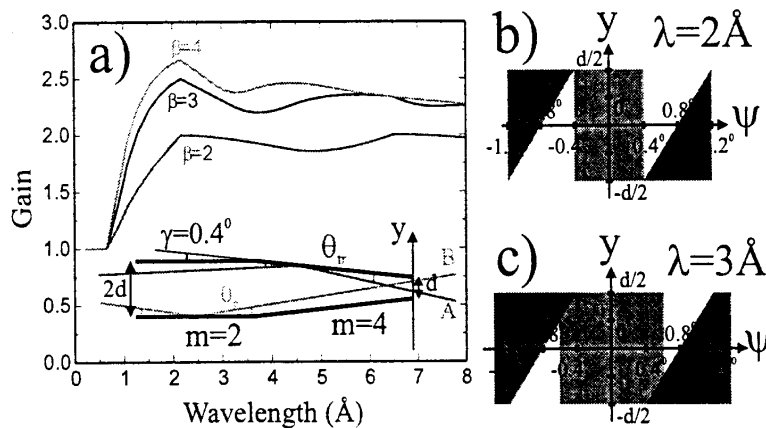


그림 3.9 Anti-trumpet type supermirror

이러한 m 이 큰 supermirror($m = 4$)는 통상의 guide($m=1$)만 쓰는 경우에는 임계 각이 작은 낮은 파장($< 3\text{\AA}$)에서는 투과율이 낮아지므로, 이를 보완하기 위하여 그림 3.8과 같은 Trumpet모양의 supermirror($m=3,4$)를 빔 tube 선단부분에 설치하여 원자로에서 나오는 열중성자까지 monochromator에 집속하는데 사용할 수 있다.[20] 또한 반대로 그림 3.9처럼 anti-trumpet 모양의 supermirror를 사용하여 빔을 시료에 집속시킬 수 있으며, ILL의 IN3의 열중성자용 3축 분광장치에 이러한 supermirror를 설치하여 에너지 13.4meV에서 약 2.5배의 중성자 강

도를 얻었다고 보고되었으며[21], LLB의 G6.1에서도 2개의 focusing anti-trumpet supermirror를 사용하여 약 7배의 중성자 강도를 얻었다고 보고되었다.[22] 즉 위와 같은 결과로부터 guide에 입사하는 빔 분산각(divergence angle)을 증가시킴으로써 중성자 강도를 확실하게 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

제 3 절 Polarizing mirror의 응용

최초의 supermirror는 F. Mezei에 의해 polarized 중성자 빔 실험을 위해서 만들어졌다. 중성자 분광장치에 사용되는 mirror는 크게 3가지로 구분된다. 그중 가장 일반적인 방법은 glass나 Si 판에 코팅된 supermirror들을 곡선형으로 쌓아서 만들어 중성자 bender처럼 사용하는 것으로 1.5Å 이상의 파장을 이용하는 중성자 분광장치에 매우 유용하다. 보다 효과적인 방법은 polarizing neutron guide로 사용하는 것으로 이것은 polarizing 기능이 없는 Ni/Ti supermirror와 비교해서 투과율이 단지 50% 밖에 줄어들지 않는다는 장점이 있다. 중성자 빔 실험에서 가장 효율적으로 사용하기 위해서는 중성자 guide 밖에 polarizing cavity를 설치하는 것이다. 이것은 한 방향의 polarizing state가 guide를 투과하는 동안 다른 방향의 polarizing state는 guide 밖으로 반사시키게 만들 수 있다.[23]

만약 산란거리 밀도 ρ_{nm} 을 갖는 비 자성 재료(non-magnetic materials)와 산란거리 밀도 $\rho_{\pm} = \rho_n(\text{nuclear}) \pm \rho_m(\text{magnetic})$ 을 갖는 자성재료를 조합하여 한 층의 spin state 산란거리 대비가 0으로써 다른 한층은 큰 산란거리 대비를 갖는 supermirror를 만들 수 있다. 즉, 코팅 재료 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{48}\text{V}_2/\text{TiN}_x$ 을 사용하고 N의 농도를 조절하여 $\rho_{nm} = \rho_-$ 을 갖는 mirror층을 만들면, 이것은 spin down을 갖는 중성자들에 대해서는 산란거리 대비를 0이 되는 remanent supermirror를 만들 수 있다.

그림 3.10은 PSI에서 제작한 $m=2$ 인 $\text{Fe}_{50}\text{Co}_{48}\text{V}_2/\text{TiN}_x$ supermirror를 guide filed에 놓고 자장에 따른 반사율을 보인 것이다. 초기에는 supermirror를 $B = -30$ mT에서 자화시키고, $B = +1$ mT 및 $+30$ mmT로 증가시켜 각각 반사율을 측정하였다. 데이터는 자화율 M이 B 방향의 반대방향에서 평행한 방향으로 변환되었음을, 즉, polarizer가 $B = 1$ mT에서 remanent 상태로 되었다는 것을 알 수 있다. 또한 remanent 상태라 할 지라도 flipping rate가 매우 좋음을 알 수 있으며, 이는 이 supermirror를 spin selective device로도 사용할 수 있음을 보여주는 것이며, 이러한 supermirror를 사용할 때는 spin flipper가 필요하지 않다.

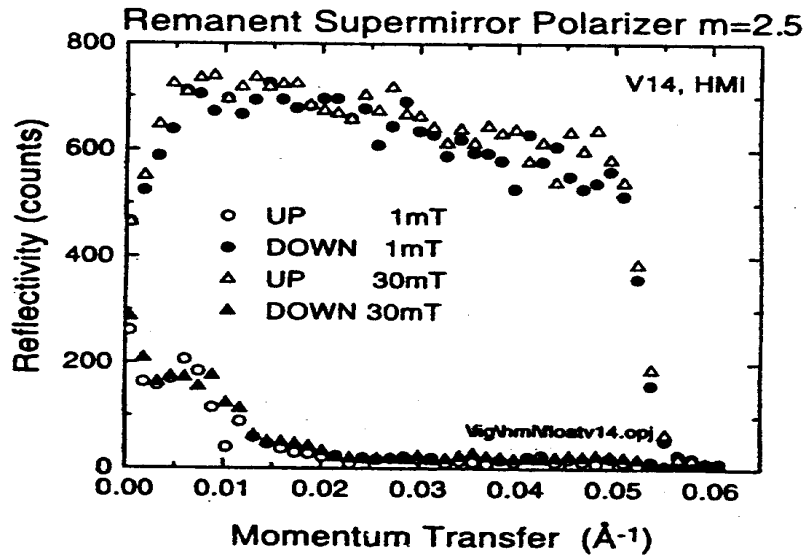


그림 3.10 The measured reflectivity of Remanent supermirror polarizer

이러한 remanent supermirror의 또 다른 장점은 magnetic pulse에 의해서 spin eigenstate를 선택할 수 있고, 시료에서의 magnetic field와 flipper 사이에 혼선 (cross-talk)이 없으며, 또한 flipper가 파장에 무관하여 자기장이 없는 환경에서도 polarizer로 사용할 수 있다는 것에 있다. 이에 대한 장치는 현재 파장이 1Å 정도에서도 사용할 수 있는 $m > 4$ 인 supermirror를 개발 중에 있다.

러시아의 PNPI에서도 반사 코팅 물질은 CoFe/TiZr 합금, Co/Ti, Fe/Al 등을 이용한 polarizing supermirror를 개발하고 있으나, m 인 큰 supermirror의 제작에서는 PSI의 기술보다 다소 떨어지고 있다. PNPI에서 만든 supermirror들은 mirror 바닥 층에 Ti와 Gd로 만들어진 중성자 흡수 층을 만들어 substrate(유리)로부터의 반사 효과를 제거하며, $\text{Co}_{63}\text{Fe}_{31}\text{V}$ 와 $\text{Ti}_{75}\text{Zr}_{25}$ 합금에 그리고 $\text{Ti}_{60}\text{Zr}_{10}\text{Gd}_{30}$ 흡수 층을 갖는 supermirror는 좀더 널리 사용되고 있다.[5] 그림 3.11에는 $m=2$ 인 CoFe/TiZr의 polarizing supermirror에 대해서 spin-up 중성자들의 실험 반사율뿐만 아니라 mirror의 분극률을 수직파장에 대한 함수로 나타내었다. 그림 3.6과 그림 3.11로부터 Ni/Ti supermirror의 반사율이 CoFe/TiZr supermirror의 반사율보다 훨씬 좋을 수 있다. 이것은 열적으로 연마된 유리(거칠기 RMS $\cong 3-5\text{\AA}$) substrate위에 Ni/Ti supermirror의 다층구조가 증착되며, CoFe/TiZr

supermirror는 glass substrate위에 중성자 흡수체가 반사되고 거칠기 RMS $\cong 17\text{\AA}$ 인 바닥층 위에 다층구조가 증착되기 때문이다. 이러한 편극된 mirror는 자기장의 방향과 평행한 중성자 스핀을 갖는 단일 스핀상태의 중성자만을 반사하도록 되어 있다.

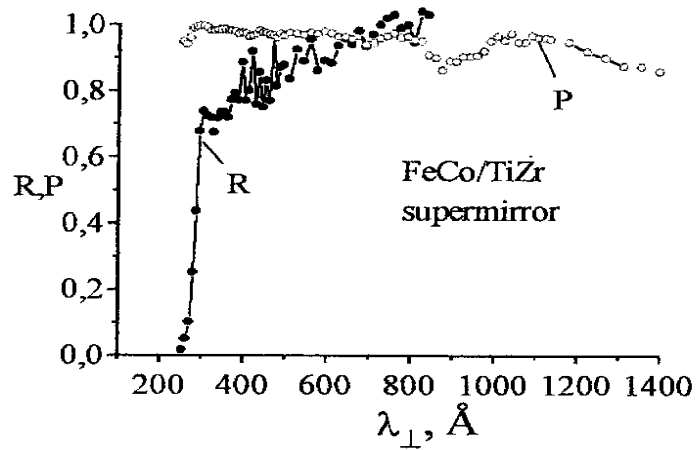


그림 3.11 Experimental reflectivities for spin-up neutrons and the polarizing efficiency of CoFe/TiZr supermirror with a TiZrGd antireflective underlayer produced in PNPI are given as a function of the perpendicular wavelength.

제 4 장 하나로 V-bender 개발

제 1 절 개요

하나로 CN 수평공에는 소각산란중성자 분광(SANS)장치가 제작 설치중이다. 이 장치는 기본적으로 원자로 노심에서 직접 나오는 백색중성자(white neutron) 중에서 파장이 4Å 이상인 냉중성자를 중성자 속도 선별기를 이용하여 단색화시켜 시료에 입사시키고, 시료를 투과 산란된 중성자를 2차원 중성자 검출기로 검출하여 분석함으로써 시료내의 미시구조를 연구하기 위한 것이다. 따라서 시료에 입사되는 단색 중성자에는 기본적으로 열중성자, 열외, 속중성자 및 감마선이 혼합되어 있어, 높은 background signal과 검출기를 손상시키는 원인이 된다. 이들의 기여를 최소화하기 위해서 중성자 필터로는 Bragg cut-off 파장이 3.96Å인 Be 다결정을, 감마선 필터로는 Bi 단결정을 액체질소로 냉각하여 주로 사용하고 있다. 통상 사용되는 이러한 필터에 의한 총 투과율은 약 50%정도이나 아직도 중성자 검출기가 원자로의 직선 빔의 영향에서 벗어나지 못하고 있다. 위에서 설명하였듯이 냉중성자원과 수 십 미터의 중성자 guide를 사용하는 경우에는 이러한 background가 크게 문제되지 않으나, 냉중성자원 없이 원자로 홀에 설치되는 SANS 장치에서는 이러한 영향을 무시할 수 없다.

그러나, m(Ni의 임계 각에 대한 supermirror 임계각의 증가계수)이 큰 중성자 supermirror를 사용하며 만든 짧은 길이의 다중슬릿 중성자 bender를 중성자 및 감마선 필터로 이용하면, 기존의 액체질소 냉각 Be/Bi 필터를 이용하는 경우보다 중성자 강도에서는 다소 손실을 보지만 원자로의 직선 빔으로부터 시료의 위치를 벗어나게 할 수 있으므로 signal-to-noise 비를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 목적으로 하나로 SANS 장치의 필터로 사용될 중성자 V-bender를 러시아의 PNPI에서 제작하였으며, 하나로 CN 수평공에서 US-1 분광장치 및 Fermi chopper를 이용하여 파장에 따른 투과율, 입사 빔에 대한 투과 빔의 이탈 각(angular deviation) 등의 중성자 특성평가를 수행하였다. 본 절에서는 하나로 SANS 장치의 V-bender 제작 및 중성자 특성평가 결과에 대해서 상세히 기술하고자 한다.

제 2 절 하나로 V-bender 제작

하나로 SANS 장치의 시료 전 비행경로(pre-flight path)는 약 4m의 빔 집속기를 사용하도록 되어 있다. 따라서 V-bender는 빔 집속기의 바로 전방에 설치되며, V-bender를 통과한 빔이 약 4m 떨어져 있는 시료 위치에서 CN 수평 공의 직선 빔 중심으로부터 약 18cm 벗어나도록 설계 제작되었다. 그림 4.1은 하

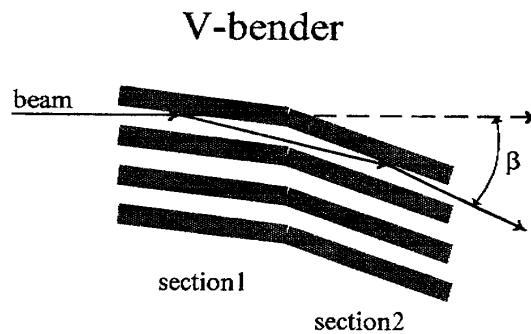


그림 4.1 하나로 SANS 장치의 V-bender 개략도

나로 SANS 장치의 V-bender에 대한 개략도이다.

V-bender는 길이가 400mm인 두 개의 다중슬릿 section으로 구성되어 있으며, section 2는 section 1에 대해 $\beta/2$ 의 각을 이루고 있다. 각 section의 슬릿은 glass substrate에 Ni/Ti를 코팅하여 단위 파장 당 임계 각 $\theta_c = 3.3 \text{ mrad}/\text{\AA}$ ($m=2$)인 supermirror로 구성되어 있다. SANS 실험을 위한 냉중성자 파장은 4\AA 보다 커야 하므로, V-bender의 각 section은 두께가 0.7mm인 supermirror 12장을 4.5mm 간격으로 설치하여 bender cut-off 파장이 약 3.48\AA 이 되도록 하였다. 여기서 β 는 입사 빔에 대한 투과 빔의 이탈 각(angular deviation)으로써 $\sim 46 \text{ mrad}$ 이 되도록 설계하였다. 또한 각 glass substrate의 반대 면에는 중성자 흡수체인 TiZrGd를 코팅하여 주(main) 투과 피크로부터 $\sim \pm\beta/2$ 에 나타나는 위성(satellite) 피크가 제거되도록 하였다. 이렇게 설계된 V-bender의 제작도면을 그림 4.2에 나타내었다.

V-bender를 통과하는 중성자들의 반사 경로를 해석적으로 관찰하기 위해 각

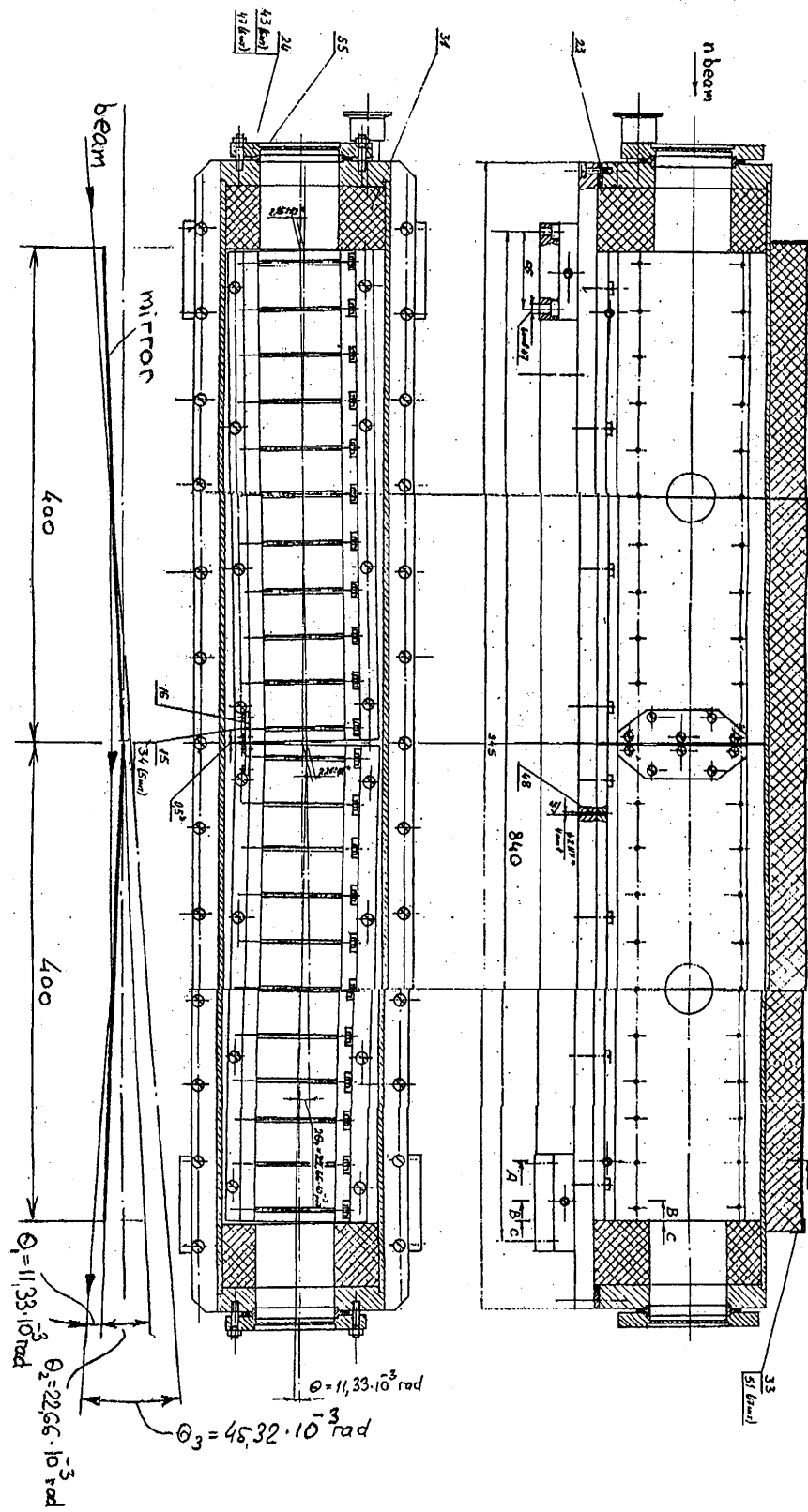
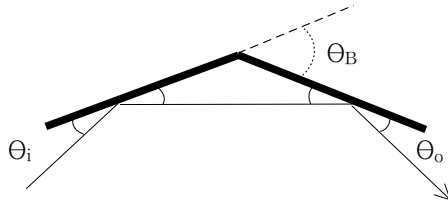


그림 4.2 하나로 V-bender 제작도면

(a) 대칭반사

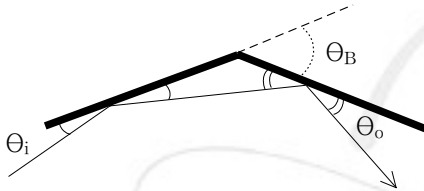


$$\beta = 46 \text{ mrad}$$

$$\theta_B = \beta/2 = 23 \text{ mrad}$$

$$\theta_i = \theta_o = \theta_B/2 = \beta/4 = 11.5 \text{ mrad}$$

(b) 비대칭반사



$$(\theta_i + \theta_o) = \theta_B = 23 \text{ mrad}$$

$$\theta_i = \theta_o \leq \theta_C = 3.3 \text{ mrad/\AA}$$

(c) 비대칭반사 가능한 입사빔의 각분포

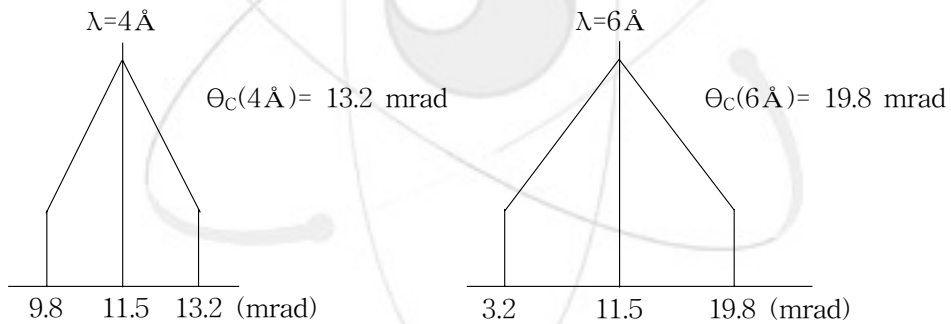


그림 4.3 V-bender의 중성자 반사각

section의 슬릿 하나씩만 고려하자. 즉 슬릿 한 쌍에 대한 중성자의 반사경로를 고려하면 그림 4.3과 같이 두 가지 경우로 나눌 수 있다. 그림 4.3의 (a)는 중성자가 대칭반사를 하는 경우로써 이때 중성자의 입사각은 $\beta/4$ 이어야한다. 이보다 크거나 작은 각으로 입사하는 중성자는 그림 4.3의 (b)와 같이 비대칭반사를 하

계된다. 이 경우 중성자의 반사 가능한 입사각은 mirror의 반사 면의 파장에 따른 임계 각에 따라 달라지며, 결과적으로 파장에 따라 V-bender 투과 빔의 투과율이 달라질 것이다. 그림 4.3(c)는 입사 빔의 파장이 4Å과 6Å일 때 투과 가능한 입사 빔의 각 분포, 즉 평행한 빔이 V-bender에 입사할 때 V-bender 회전각에 따른 투과율을 계산하여 나타낸 것이다.

그러나, 실제 V-bender에서는 여러 개의 슬릿을 일정 간격으로 배열함으로써, 또 반사 면(supermirror)의 반대 면을 중성자 흡수체로 코팅함으로써 입사 빔의 파장에 관계없이 투과 빔의 각 분포를 일정하게 조절할 수 있다. 0.3mm 두께의 거울이 4.05mm 간격으로 배열되어있는 V-bender의 경우, 여러 파장의 입사 빔에 대한 투과 빔을 이론적으로 계산하여 그림 4.4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 파장이 증가함에 따라 투과율을 증가하는 것에 비해 투과 빔의 각 분포는 파장에 무관함을 알 수 있다.

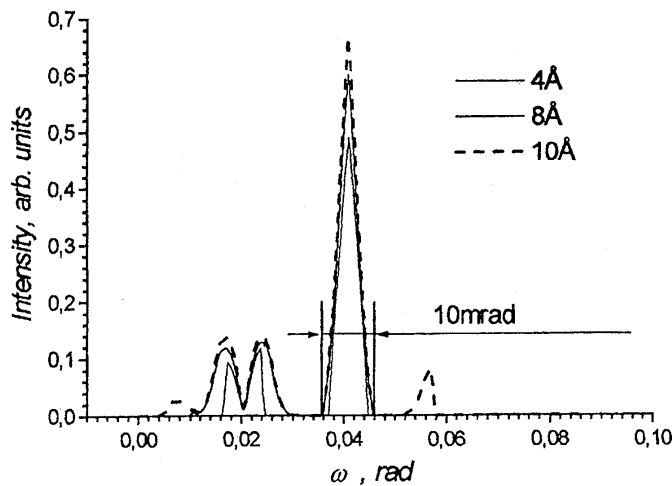


그림 4.4 여러 파장의 중성자빔에 대한 V-bender 투과빔의 각도 분포 및 강도

또한, V-bender는 빔을 굴곡시키는 특성 외에 multi-slit(soller) collimator의 특성을 가지고 있으므로, 주 투과 피크의 $\pm\beta/2$ 주변에는 위성 피크가 존재한다. 이들 위성 피크는 그림 4.3(b)에서와 같이 중성자가 비대칭반사를 하는 경우와 section 하나에 의해서만 반사되는 경우에 발생되며, mirror 반사 면의 반대면에 TiZrGd 합금으로 구성된 중성자 흡수 물질을 코팅함으로써 거의 제거할 수 있다. 그러나, 넓은 분산 각을 갖는 입사 빔을 사용할 경우에는 $-\beta/2$ 주변의 위

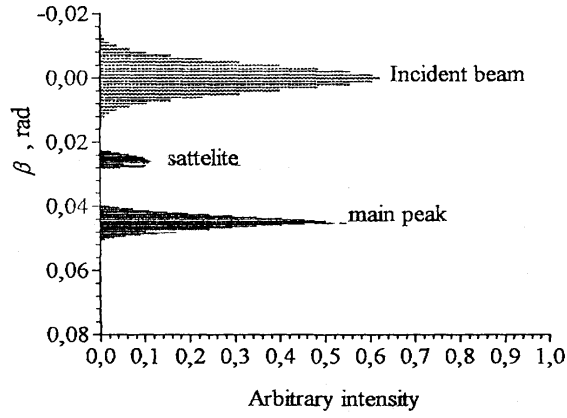


그림 4.5 입사빔과 V-bender 통과빔의 이론적인 위치와 강도

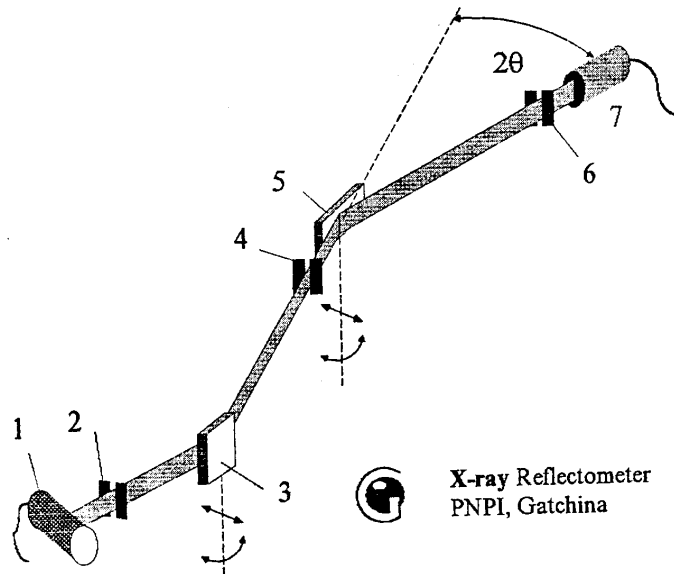


그림 4.6 중성자 bender channel의 geometry를 검사하기 위한 X-ray reflectometer; 1-X-ray source, 2-slit 1, 3-Si monochromator, 4-slit 2, 5-sample(e.g. bender), 6-slit 3, 7-dtector

성 피크를 완전히 제거하는 것이 불가능하다(그림 4.5). 이 위성 피크는 section 2에 의해서만 반사되는 중성자에 의한 것으로써, 입사 빔의 분산 각이 매우 작을 경우에만 제거된다. 또는 bender 후단에 collimator를 설치함으로써 간단히 제거할 수 있다.

V-bender의 제작에 사용된 길이가 400 mm이고 두께가 0.7 mm인 24개의 supermirror들을 그림 4.6에 보인 X-ray reflectometer를 이용하여 supermirror의 geometry 및 중성자 광학 계수들을 검사하였다. 그림 4.1과 4.7에 보인 실험 배치에서처럼 각 반사 mirror의 구조는 bender section의 임의 고정 각에 대해서, x-scan으로 얻은 반사 빔의 각도로부터 추론할 수 있다. 즉, 각 +section에서 평균 법선 방향(mean normal direction) $\langle \vec{n} \rangle$ 을 다음과 같이 찾고,

$$\langle \vec{n} \rangle = \frac{1}{12} \sum_{i=0}^{12} \frac{1}{L} \int_0^L \vec{n}(y) dy$$

이로부터, 국소 표면 법선(local surface normal)이 각도 ϕ 만큼 이탈(deviation)할 확률을 묘사하는 분포함수 $f(\phi)$ 를 얻을 수 있다. 예를 들어 그림 4.8은 section에 대한 분포 함수 $f(\phi)$ 를 나타내었으며, 이는 모든 mirror의 y위치에서 측정된

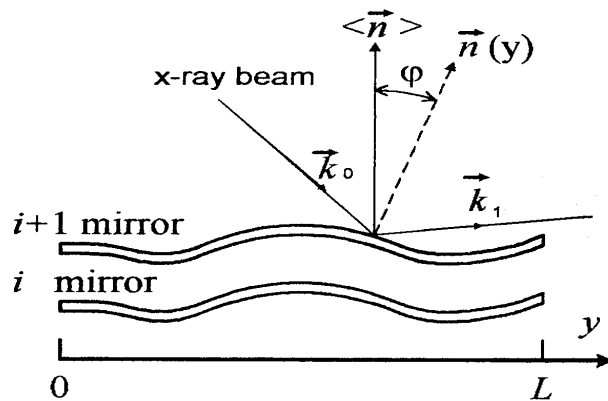


그림 4.7 X-ray 빔에 의한 V-bender 검사 개략도; k_0 와 k_1 은 각각 입사빔과 반사빔에 대한 파수 벡터, $n(y)$ 는 y 위치에 대한 표면 법선 벡터로써 scattering 벡터와 평행하다.

X-ray 빔의 평균 이탈 각(deviation angle)으로부터 얻어진다. 각 section에서 평균값으로부터 얻어진 표면 법선의 평균 이탈은 $0.5 \text{ mrad}(0.03^\circ)$ 이다.

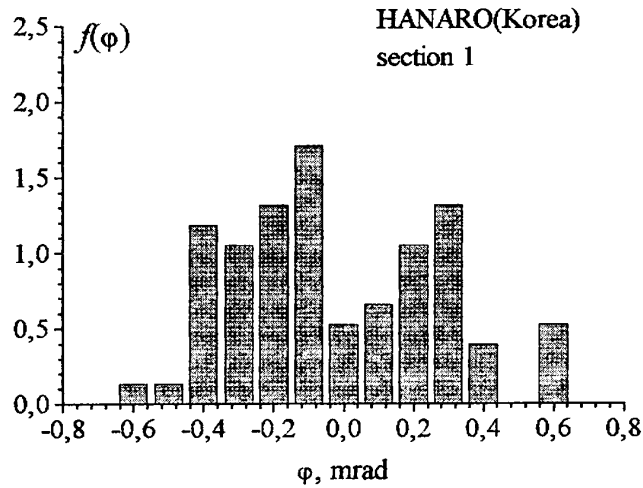


그림 4.8 V-bender section 1의 각각 다른 channel에 대해서 다른 y 위치에서 측정된 X-ray 반사빔의 이탈 각도 (angular deviation)를 나타내는 분포 함수 $f(\phi)$

그림 4.9는 과장에 따른 V-bender의 투과율을 계산한 것으로써, 곡선 1과 3은 완전한 한 개의 channel 구조에 대한 계산 값이고, 곡선 2와 4는 위와 같은 V-bender를 구성하는 모든 channel들을 조립한 실제 V-bender의 구조를 고려한 것이다. 여기서 입사 빔의 분산 각은 0.5° 로 가정하였으며, 곡선 3과 4는 위성 피크들을 보정한 투과곡선이다. 투과율이 상대적으로 낮은 것은 그림 4.5에서 보인 것처럼 V-bender가 투과 빔을 부분적으로 collimation하기 때문이다.

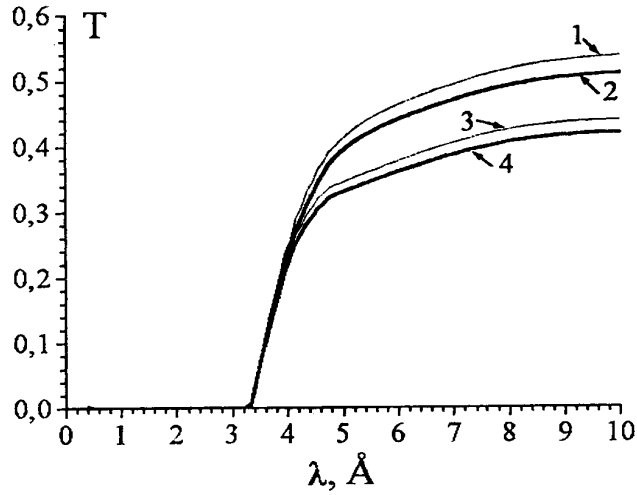


그림 4.9 중성자 파장에 대한 V-bender의 이론적인 투과율; 곡선 1과 3은 완벽한 geometry를 갖는 channel에 대한 것이며, 곡선 2와 4는 X-ray reflectometry로 얻은 실제 곡률을 고려한 channel에 대한 것이다. 곡선 3과 4는 위성 피크의 효과를 배제하고 계산한 것이다.

제 3 절 실험 및 결과

1. V-bender 투과 빔의 이탈 각(angular deviation, β) 측정

앞에서 설명한 것처럼 section 1과 section 2의 사이 각이 $\beta/2$ 일 때, 대칭반사에 의해 생기는 주 피크는 section 1에 $\beta/4$ 의 각으로 입사되는 중성자들에 의한 것으로 β 에서 나타난다. 또한 $\sim \beta/2$ 에 나타나는 위성 피크는 중성자의 비대칭 반사, 즉 하나의 section에 의해서만 반사된 중성자에 의한 것이다. 이들 피크의 위치를 확인하기 위해서 CN 수평공의 백색 중성자(white neutron) 빔 및 PG(002) 반사에 의한 단색화 빔을 이용하여 V-bender 투과 빔을 측정하였으며, PG(002)면의 2차 반사와 감마선의 영향을 제거하기 위해서 20 cm - Bi 단결정 및 10 cm - Be 다결정을 필터로 사용하였다.

가. 백색 중성자 빔(white neutron beam)에 대한 이탈 각 측정

V-bender의 이탈 각 β 를 확인하기 위해서는 먼저 입사 빔의 위치(절대 기준 점 0°)를 찾아야한다. 측정에 대한 개념도를 그림 4.10에 나타내었으며, 측정 절차는 다음과 같다. 절대 기준위치를 확인하기 위해서 임의의 위치로부터 bender를 시계방향으로 회전시키면서 투과 빔을 측정한다. 이때 회전축은 bender의 중심, 즉 section 1과 section 2의 접점과 일치해야 하며, 그림 4.10에 점O로 나타내었다. 주 피크는 입사 빔이 section 1에 $\beta/4$ 의 각도로 입사할 때 생기며, 이때 투과 빔의 위치를 그림 4.10(a)에서 a로 표시하였다. V-bender를 주 피크가 측정되는 위치로부터 180° 회전시키면 그림 4.10(b)와 같이되며, a는 그림 4.10(b)에서 b로 표시된다. 바로 이 위치가 V-bender를 투과한 빔이 입사 빔과 평형을 이루는 위치로써 절대 기준 점 0° 이다. 점선으로 그려진 V-bender slit은 180° 회전하기 전의 상태이다. 다시 V-bender를 반 시계 방향으로 회전시켜서 b가 입사 빔의 위치에 오도록 하면 주 피크가 측정된다. 이때의 회전각도 즉, b로부터 입사 빔까지의 각도가 $\beta(= \beta/4 + \beta/2 + \beta/4)$ 이다.

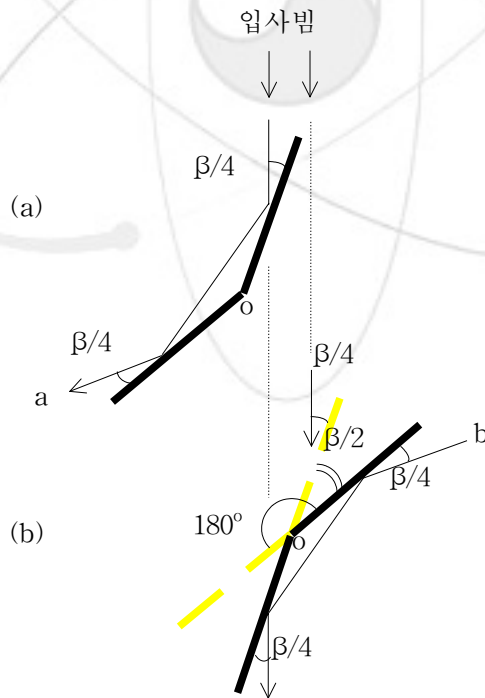


그림 4.10 V-bender에 대한 중성자 경로

본 측정에서 사용된 입사 빔의 분산 각은 0.35° 이며, 측정결과는 그림 4.11에 나타내었다. 주 피크는 약 2.60° 에서 관찰되었으며, 이는 V-bender 설계 값 ($\beta = 46 \text{ mrad} \approx 2.63^\circ$)에 비교적 근접한 값으로 약 1%의 오차를 보이고 있다. 약 1.57° 에 나타나는 작은 피크가 $\sim \beta/2$ 위치에 나타나는 위성피크로써, 설계 값 1.3° 와는 약 12%의 차이를 보이고 있다.

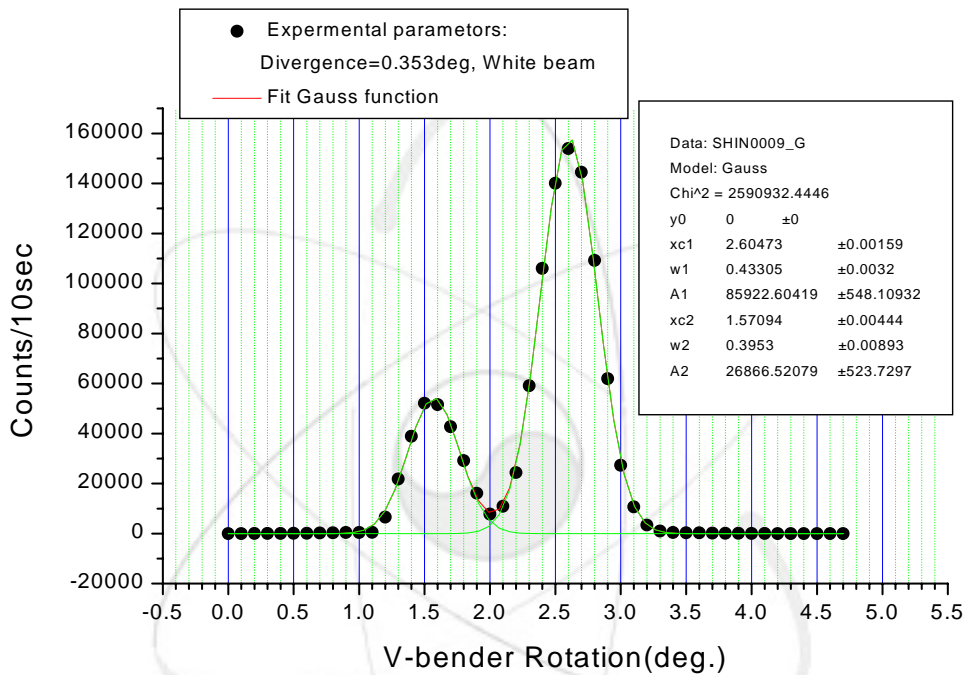


그림 4.11 백색 중성자빔에 대한 V-bender 투과빔의 측정 결과; 입사빔의 분산각 = 0.353°

그림 4.12(a)는 분산 각 0.33° 의 입사 빔에 대한 V-bender 투과 빔을 이론적으로 계산한 것이다. 여기서 주 피크는 약 2.67° 로써 실험 값과 약 3%, 설계 값과는 약 1.5%의 오차 범위 내에 있으며, 위성 피크는 1.57° 로써 실험 값과 거의 일치한다. 즉, 주 피크는 실험 값, 이론 값 및 설계 값이 근사하지만, 위성 피크의 경우 실험 값 및 이론 값이 설계 값 ($\beta/2$)과 조금 차이를 보이고 있다. 위성 피크를 만드는 입사 중성자의 경로를 개략적으로 구상하면 다음과 같다.

그림 4.13에서와 같이 중성자가 section 2에 의해서만 반사된 후 V-bender를

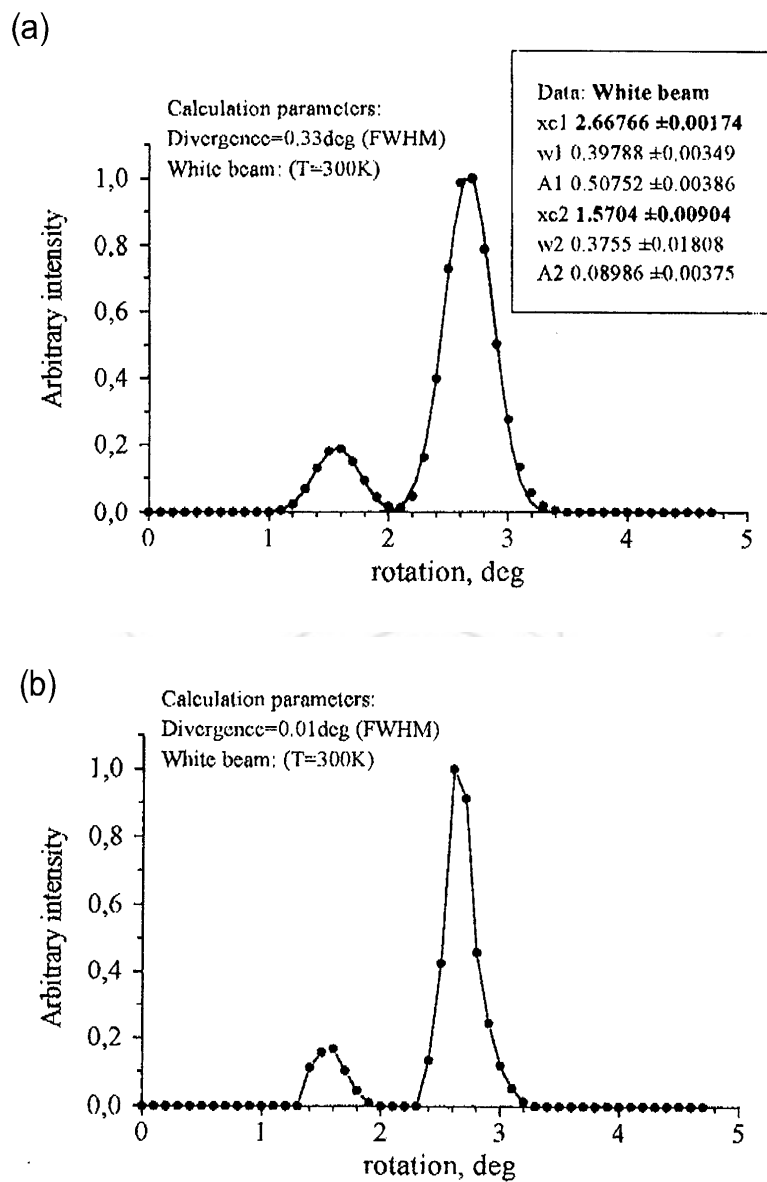


그림 4.12 백색 중성자빔에 대한 V-bender 투과빔의 이론적 계산 결과; (a) 입사빔의 분산각 = 0.33°, (b) 입사빔의 분산각 = 0.01°

통과하기 위해서는, 입사되는 중성자의 각도는 각 a_1 보다 작고 각 a_2 보다 커야 한다. 기하학적으로 계산하였을 때, a_1 은 $\beta/2$ 이며 a_2 는 $\sim 0.013^\circ + \beta/4$ (0.013° 는 슬릿의 폭과 길이에 관계된 값)이다. 즉, 입사각 θ 는 $(0.013^\circ + \beta/4) < \theta < \beta/2$ 의 조건을 만족하면 된다. 그러나, 중성자가 section 2에서 반사된 후 section 2'에 부딪히지 않고 슬릿을 빠져 나오려면 θ 는 $\beta/4$ 근처 값이어야 한다. 그러므로 실제로 위성 피크를 만드는 가능한 θ 는 a_2 ($\sim 0.013^\circ + \beta/4$)에 근접한 값이 된다. 그 경우 위성 피크의 위치인 산란 각 2θ 는 $\sim 0.026^\circ + \beta/2$ 로써 1.34° 이상이 된다. 그러나 이 값은 슬릿 한 쌍만을 고려한 것이며 총 12쌍의 슬릿이 있는 V-bender의 경우에는 그림 4.12(a)와 비슷한 결과를 줄 것이다.

V-bender 통과 빔의 반치폭(FWHM) 또한 실험결과와 이론적 계산결과에 약간의 차이가 있으며, 이것은 입사 빔의 분산각과 관련 있다. 입사 빔의 분산각이 0.33° 일 때와 0.01° 일 때 각각에 대한 이론적 계산결과인 그림 4.12의 (a)와 (b)를 비교해보면 입사 빔의 분산 각이 0.01° 일 때 주 피크와 위성 피크 모두 반치폭이 작아졌음을 확인할 수 있다. Fine collimated 빔의 경우에 통과 빔의 각 분포는 bender의 기하학적 구조가 아닌 빔 collimation에 의존하기 때문이다. 따라서 입사 빔의 분산 각이 작아지면 통과 빔의 반치폭도 감소한다.

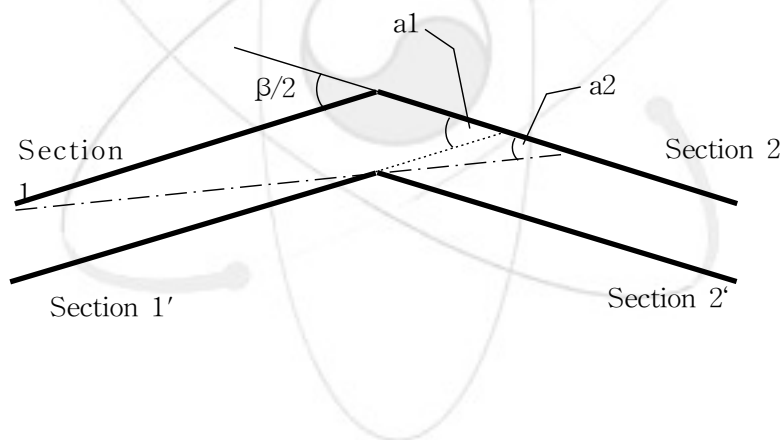


그림 4.13 위성 피크를 만드는 중성자의 입사각도

나. PG(002) 단색화 빔에 의한 이탈 각 측정

V-bender 내부에는 12개의 슬릿 window가 있으며, 각 window 폭은 4.5mm이다. 본 실험에서는 한 개의 슬릿 window만을 고려하기 위하여 V-bender 입구에 폭이 3 mm인 Cd 슬릿을 부착하였다. 단색화 결정으로

PG(002)를 사용하였으며, take-off angle은 80°, 90°, 100°로써 각각 4.31 Å, 4.74 Å, 5.14Å 파장의 입사 빔을 얻도록 하였다. 각각의 입사 빔에 대하여 백색 중성자 빔을 이용하여 측정한 방법과 동일한 방법으로 β 를 측정하였다. β 는 입사 빔 파장의 증가에 따라 2.56°, 2.59°, 2.6°로 조금씩 증가하였으며, 실제 값인 2.63°과는 최고 2.7%정도의 차이를 나타냈다. 앞 절에서 설명한 mirror의 waviness에 의한 최대 오차 1.1% 보다는 약간 크다.

그림 4.14는 파장에 따른 투과 피크의 반치폭(FWHM)을 비교하기 위하여 각 피크의 maximum point를 일치시켜 그린 것이다. 4.31Å, 4.74Å에 대한 피크의 반치폭은 약 0.286°로 거의 같으나, 5.14Å에 대한 피크의 반치폭은 약 0.294°로 조금 다른 값을 보여준다. 그러나 β 및 반치폭의 이러한 차이는 측정 오차 범위의 값으로 볼 수 있으며, 입사 빔이 넓은 경우에는 β 와 반치폭 모두 파장에 크게 영향 받지 않는다.

만약, V-bender의 슬릿 한 쌍(section 1과 section 2에서 각각 하나씩)만을 고려한다면, 그림 4.3에서 언급한 것과 같이, 입사 빔의 파장이 증가할수록 피크의 반치폭도 증가하게 될 것이다. 또한 supermirror의 반사율이 1이고 입사 빔의 분산이 거의 없다면, 피크의 모양은 "house" 형태가 될 것이다(그림 4.3(c)). 그러나 실제로 supermirror의 반사율은 0.8~1의 값을 가지며, 입사 빔 또한 어느 정

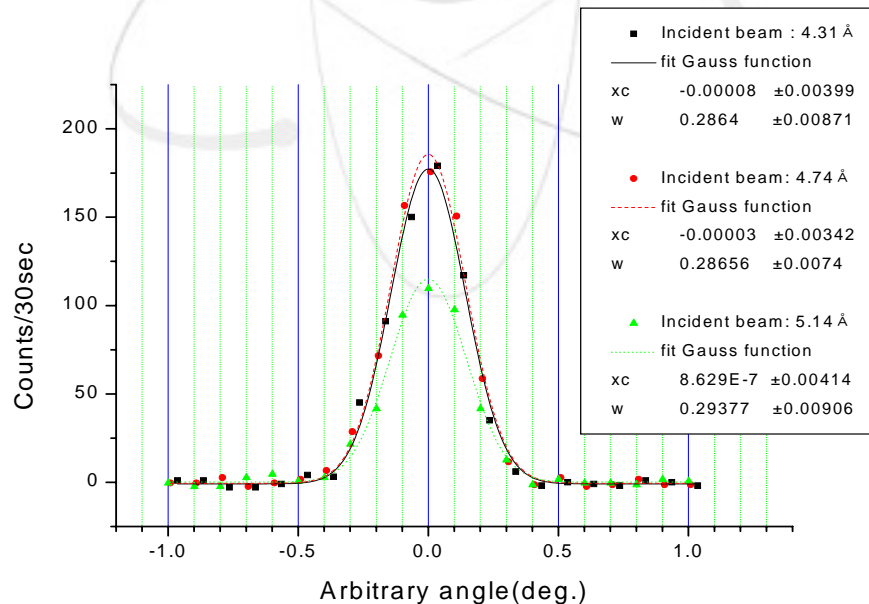


그림 4.14 입사빔 파장에 따른 V-bender 투과빔의 비교

도의 분산 각을 가지므로 실제 bender를 투과한 피크의 모양은 "Gaussian" 형태가 된다. 또한, V-bender에는 4.5 mm의 간격으로 슬릿들이 배열되어있고, supermirror의 반대 면은 중성자 흡수체로 되어있기 때문에, 그림 4.14와 같이 측정되는 피크의 반치폭은 과장에 무관하며 일정한 값을 갖게 된다.

Bender 입구에 폭 3mm의 slit을 부착했을 경우, 이론적으로 계산된 반치폭은 약 0.293°(그림 4.17(b))이다. 이론적인 계산 값과 비교하여볼 때 실험 값은 약 2.4%의 오차 범위 내에 있다.

다. Bender에 의한 직선 빔의 이탈거리 측정

V-bender를 CN 빔 중심선상에 설치한 후 회전시켜서 입사 빔이 bender 슬릿과 $\beta/4$ 를 이루도록 맞추었으며, SANS 장치에서 이용될 빔 크기와 동일한 상황을 만들기 위해서 V-bender의 입구에는 직경 30 mm의 빔 홀을 갖는 Cd 빔 개구를 설치하였다. 투과 빔의 수평 분포는 V-bender의 중심으로부터 약 3100 mm 떨어진 위치에서 측정하였으며, 이때 detector는 빔 중심선과 수직인 방향으로 이동시키며 측정하였다. 또한 CN 수평공의 빔 중심위치는 V-bender를 치우고 detector를 빔 중심의 좌우(수평)방향으로 이동하면서 측정하여 결정하였다. 그림 4.15에서 볼 수 있듯이 투과 피크는 CN 빔 중심선으로부터 약 133 mm 벗어난 곳에, 위성 피크는 77 mm 위치에 측정되었다. SANS 장치에서 V-bender

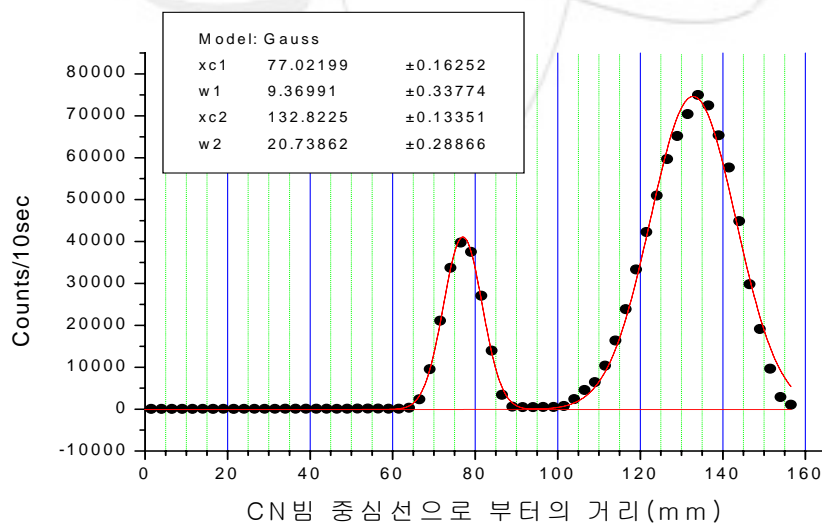


그림 4.15 CN빔 중심선으로부터 V-bender 투과빔의 위치

중심으로부터 시료까지의 거리는 대략 4000 ± 500 mm가 되도록 설치할 예정이며, 이 경우 측정결과를 바탕으로 계산하여볼 때 시료의 위치는 CN 빔 중심선에서 172 ± 17 mm 벗어나게 될 것이다.

2. 입사 빔 collimation에 따른 V-bender 투과 효과

그림 4.11는 0.353° 의 분산 각을 갖는 입사 빔에 대해서 측정한 V-bender의 중성자 투과 분포로 V-bender 회전각 $1.3^\circ \sim 1.7^\circ (\beta/2 \sim \beta)$ 사이에서 위성 피크가 관찰되었다. 위에서 설명한 것처럼 이 위성 피크는 V-bender 후단에 빔 collimator를 설치하면 간단히 제거된다. 그러나, 본 실험에서는 V-bender 바로 앞에 3 mm 슬릿을 설치함으로써, 위성 피크가 간단히 제거됨을 확인하였다.

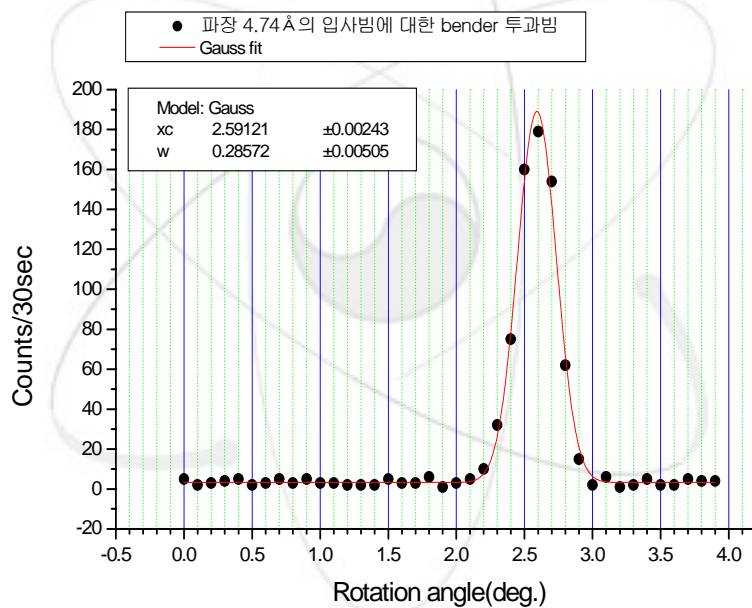


그림 4.16 파장 4.74 \AA , 분산각 $\sim 0.035^\circ$ 의 입사빔에 대하여 측정한 V-bender 투과빔의 각도 분포

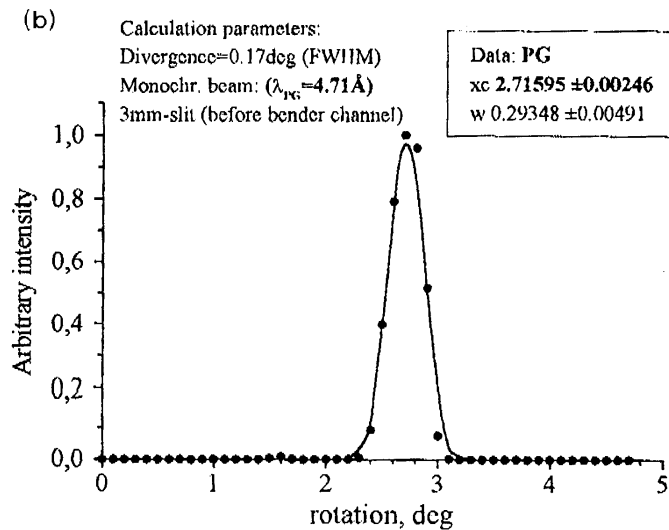
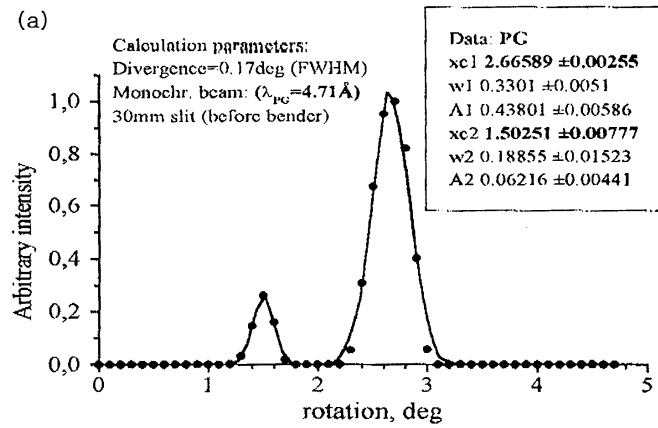


그림 4.17 파장 4.71 Å의 입사빔에 대해 이론적으로 계산한 V-bender 투과빔의 각도 분포 : (a) V-Bender 앞에 30mm slit 설치, (b) 3mm slit 설치

그림 4.16은 입사 빔을 PG monochromater를 사용하여 단색화하고 V-bender 앞에 3 mm 슬릿을 설치한 후, 즉 입사 빔의 분산 각이 약 0.035일 때 측정된 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 2.6° 근처의 주 피크 외의 다른 피크는 측정되지 않았다. 동일한 조건에 대한 이론적 계산결과를 그림 4.17에 보였다. 그

림 4.17의 (a)는 V-bender 앞에 30 mm 슬릿을 설치한 경우로 그림 4.11에서처럼 위성 피크가 존재하지만, (b)는 3 mm slit을 설치한 경우로 주 피크만이 존재한다. 따라서 입사 빔의 분산 각이 아주 작은 경우에는 위성 피크의 효과를 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다.

3. Bender의 투과율 측정

가. TOF법을 이용한 투과율 측정

TOF법을 이용한 V-bender 투과 중성자 분포의 측정은 하나로 중성자 빔 이용 연구에서 자체 설계 제작한 Fermi chopper를 이용하였다. 이 chopper의 빔 개구는 30 mm(W) x 50 mm(H)이며, 빔 shutter는 직경 54 mm의 원통형 회전체로써 두께 0.75 mm의 Al과 Cd sheet를 순차적으로 겹쳐놓은 형태이다. 즉 shutter의 슬릿 폭은 0.75 mm이고 빔의 통과 경로는 54 mm이다. Chopper의 trigger 펄스는 shutter위에 설치된 light source와 photo diode로부터 얻게 되며, chopper 1회전 당 2개의 trigger 펄스가 발생된다. 중성자의 검출에는 6Li-Glass Scintillator(75 mm Φ x 3.5 mmT : NE900)를 이용하였고, 본 실험을 위한 chopper의 속도는 3000 rpm으로 하였다.

그림 4.18에 V-bender를 설치하지 않은 상태에서 CN 빔의 중성자 스펙트럼을 TOF법으로 측정한 결과와 chopper 뒤에 V-bender를 설치한 후 같은 방법으로 측정한 결과를 나타내었다. 그림의 스펙트럼에 나타나는 dip는 감마선과 열중성자를 줄이기 위하여 빔 포트 전단에 설치한 Bi 단결정(20 cm)에 의한 것이다. Chopper 뒤에 V-bender를 설치한 경우 chopping된 중성자들이 V-bender를 통과하면서 β 각 만큼 꺾이므로 중성자의 비행거리가 조금 길어진다. 그 결과 그림 4.18의 두 곡선사이에는 channel 차이가 생기는데, Bi에 의한 dip의 위치가 일치하지 않는 것으로부터 확인 할 수 있다. 각 파장에 대한 투과율을 계산하기 위해서는 이러한 channel 차이를 보정해야하며, 그림 4.19에 channel 및 background를 보정한 결과를 나타내었다. 투과율은 그림 4.20에 이론 값과 함께 나타내었다. 측정된 투과율은 전체적으로 이론 값 보다 약 1.5 배 정도 큰데, 그 원인은 background 측정이 정확하지 못했기 때문으로 생각된다.

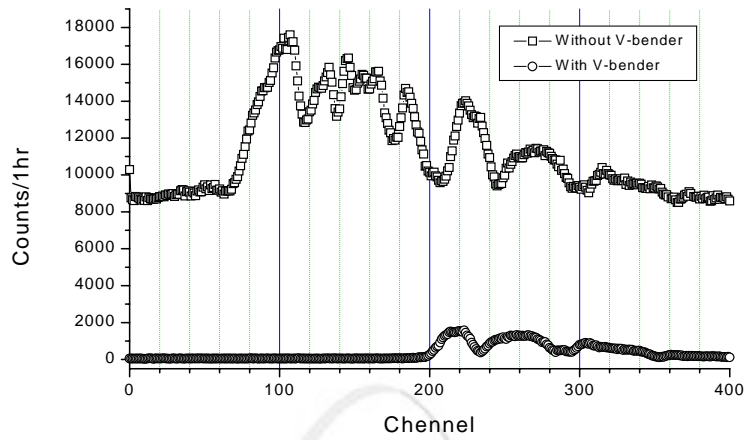


그림 4.18 TOF법으로 측정된 CN 빔 스펙트럼과 V-bender 투과빔 스펙트럼

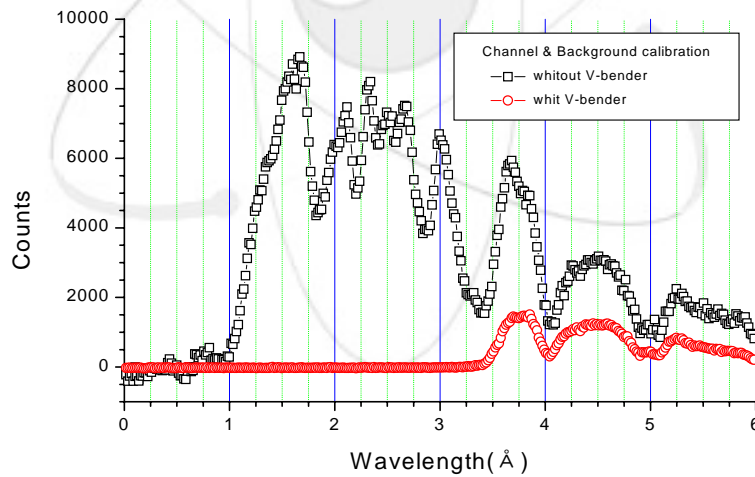


그림 4.19 TOF법으로 측정된 CN 빔 스펙트럼과 V-bender 투과빔 스펙트럼의 channel 및 background 보정

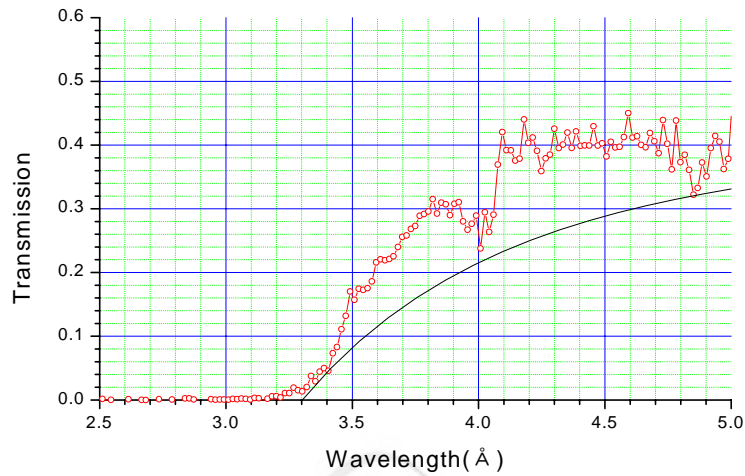


그림 4.20 TOF법으로 측정된 V-bender 투과율

나. PG(002) 단색화 빔에 의한 투과율 측정

단색화결정으로 PG(002)를 사용하였으며, n-th order 효과를 줄이기 위하여 Be 다결정 10cm를 설치하였다. Be의 cut-off 파장은 3.96\AA 이며, 10cm 장착시 PG(002)의 second order 이상의 파장을 갖는 중성자는 거의 모두 제거된다. 파장에 따른 투과율을 측정하기 위하여 PG와 detector를 $\Theta:2\Theta$ 의 비율로 rocking하며 측정하였다. 그림 4.21은 V-bender의 전단과 후단에서 중성자 빔의 스펙트럼을 측정된 결과이며, 두 경우 PG와 detector와의 거리가 서로 다르므로 거리에 따른 중성자 감쇠효과의 보정이 필요하다. 거리 및 background를 보정한 결과를 그림 4.22에 같이 나타내었다. 3.5\AA 과 4\AA 사이에 나타나는 작은 피크는 Be의 특성에 의한 것이다. 투과율은 그림 4.23에 이론적 계산결과와 함께 나타내었다. 이론적 계산 결과와 비교하여 볼 때 약 10%의 차이가 있다.

또한, 그림 4.24는 Be(10cm) 다결정과 Bi 단결정(20cm)을 설치하고 측정된 결과이다. 측정방법은 위에서 언급한 것과 같으며, 같은 방법으로 보정하여 그림 4.25에 나타내었다. 마찬가지로 3.5\AA 과 4\AA 사이에 나타나는 작은 피크는 Be의 특성에 의한 것이며, 통계적 오차에 의하여 이 부분의 투과율은 오차가 심하다. 그러나 그림 4.26에 보인 것처럼 4\AA 이상의 파장 영역에서의 투과율은 Be(10cm)만 장착된 경우 보다 좀더 이론 값에 근접한 결과를 보여준다.

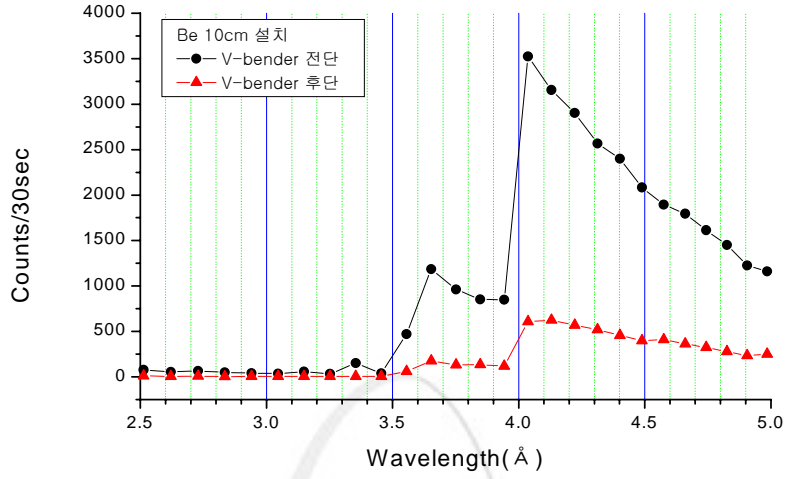


그림 4.21 PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자빔의 파장 분포 : Be 10 cm 설치

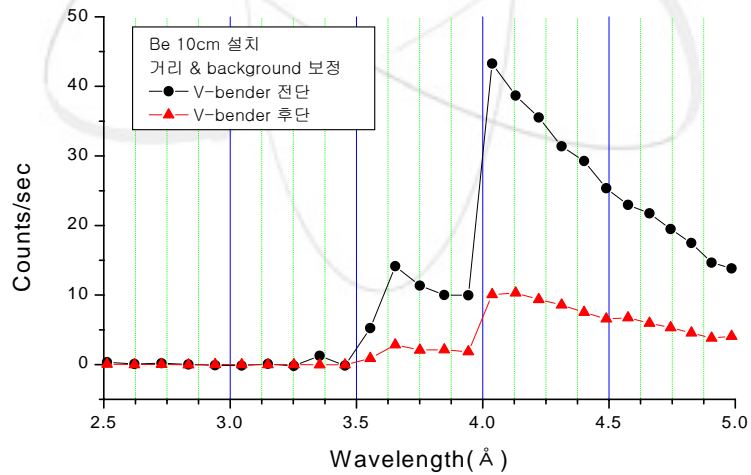


그림 4.22 PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자빔 파장 분포의 거리 및 background 보정 : Be 10cm 설치

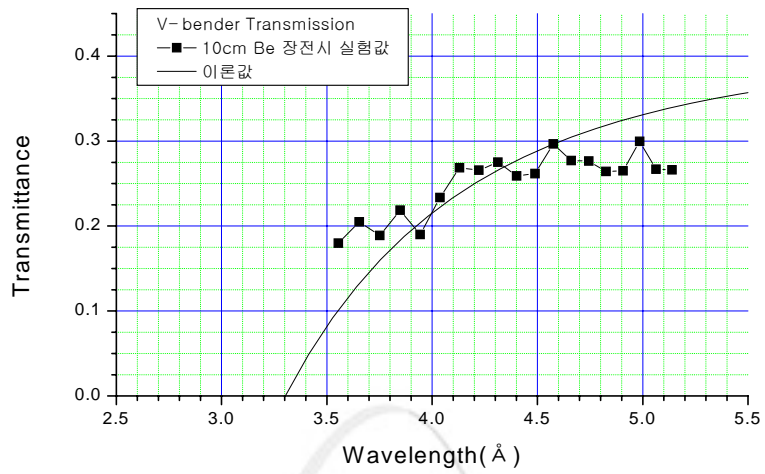


그림 4.23 PG 단색화비를 이용하여 측정된 V-bender 투과율 : 빔 포트에 10cm-Be 장전시 실험값과 이론값 비교

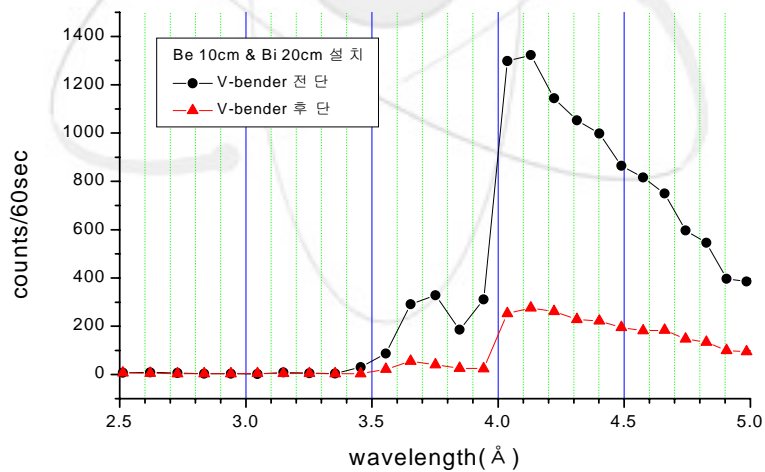


그림 4.24 PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에 서 측정된 중성자빔의 과장 분포 : Be 10cm와 Bi 20cm 설치

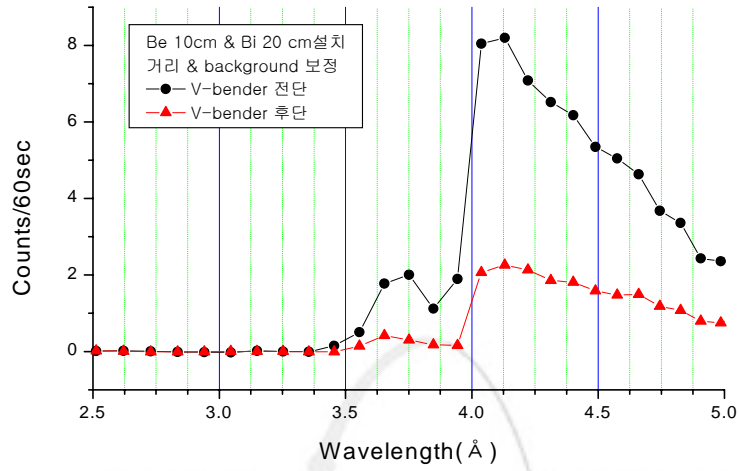


그림 4.25 PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 전단과 후단에서 측정된 중성자빔 파장 분포의 거리 및 background 보정 : Be 10cm와 Bi 20cm

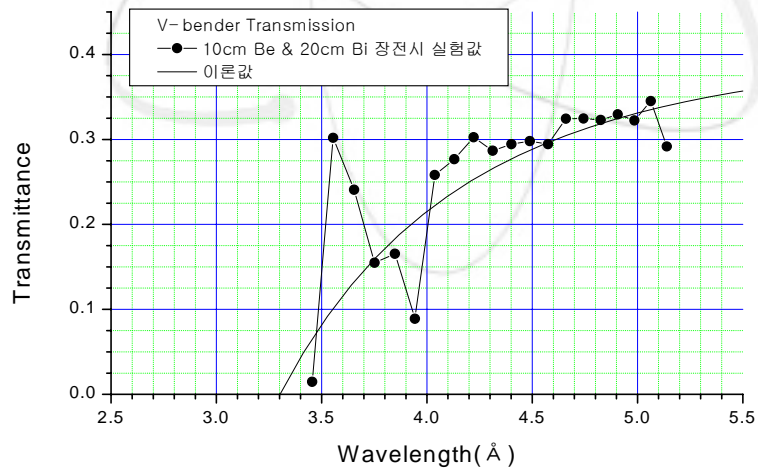


그림 4.26 PG 단색화빔으로 측정된 V-bender 투과율 : 빔 포트에 10cm-Be과 20cm-Bi 장전시 실험값과 이론값 비교

다. V-bender의 cut-off 파장 측정

Bender 슬릿을 구성하고 있는 supermirror의 임계 각 및 bender의 기하학적 구조에 의해서 bender를 투과할 수 있는 중성자의 범위, 즉 cut-off 파장이 정해진다. V-bender에 대한 cut-off 파장을 알기 위하여, PG 단색화 빔을 이용하여 CN 빔의 중성자 스펙트럼을 측정하였으며, Be 및 Bi 결정에 의해 생기는 피크를 배제하기 위하여 CN 빔 포트에 Be과 Bi를 설치하지 않고 측정하였다. 투과율의 측정에서와 같이 PG와 detector를 $\theta:2\theta$ 의 비율로 rocking하여 그림 4.27의 결과를 얻었다. 그림에서 볼 수 있듯이 V-bender의 cut-off 파장은 대략 3\AA 으로써, 그림 4.9에서 보인 약 3.3\AA 과 다소 차이가 있다. 이러한 차이는 V-bender에 입사하는 입사 빔의 분산 각에 의한 영향이다.

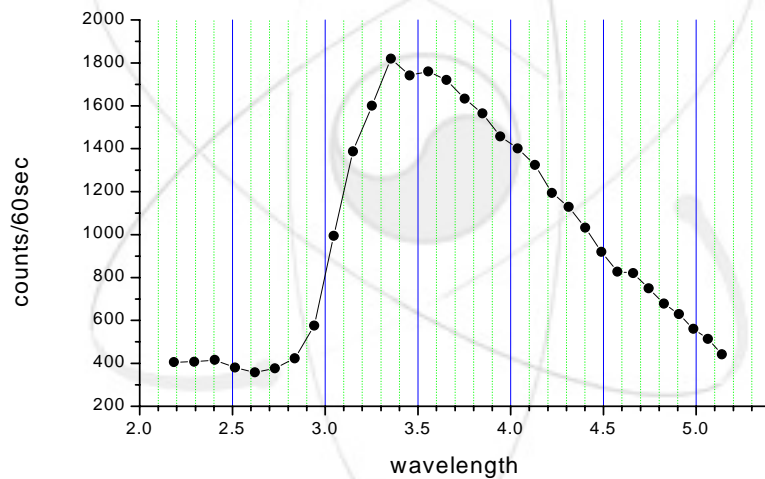


그림 4.27 PG 단색화빔을 이용하여 V-bender 후단에서 측정한 중성자빔 파장분포

제 5 장 결 론

국내 유일의 고출력 중성자원인 연구용 원자로 하나로(HANARO, 열출력 30MW)는 현재 설계 출력의 약 80% 수준인 24MW로 운전되고 있으며, 2004년 중순에는 전출력 운전이 기대되고 있다. 하나로의 7개 수평 실험공에 상호 보완적인 중성자 실험장치들을 단계적으로 설치하여 물리, 원자력, 재료과학, 화학, 생명공학, 요업 등의 광범위한 연구 분야의 기초 및 응용연구를 수행할 수 있는 연구 기반을 구축하고 있다.

현재, HRPD, NRF, FCD, SANS 장치들이 설치되어 산.학.연 외부이용자들에게 빔 타임을 제공하고 있으며, PNS와 REF 장치 개발이 거의 마무리단계이고, 3축 중성자 분광장치(Triple Axis Spectrometer, TAS)의 개발과 냉중성자원(cold neutron source) 및 중성자 유도관, 냉중성자 산란장치 등의 개발도 진행 중에 있다. 이와 같은 장치들이 완성되면 하나로는 국가 중점 연구분야인 생명공학기술(BT), 정보기술(IT), 나노기술(NT), 우주과학기술(ST) 분야의 산.학.연 이용자들이 공동으로 이용할 수 있는 범 국가적인 중성자빔 이용 연구 센터로서의 역할을 담당할 것이다.

첨단 중성자 분광기술의 하나인 중성자 supermirror의 원리, 중성자 유도관 원리에 대한 기본적인 이해는 현재 개발중인 중성자 분광장치들의 주요 부품 개발을 고도화 할 수 있는 위한 기반 기술이며, 후일 냉중성자원 개발 시에 중성자를 거의 손실 없이 수십 미터까지 유도할 수 있는 중성자 유도관의 설계라든지 또는 중성자 supermirror를 이용하는 중성자 소각산란장치, 3축 중성자 분광장치, 편극 중성자분광장치 등 첨단 중성자 분광장치의 개발에 활용될 수 있다. 또한 중성자 supermirror로 제작된 중성자 V-bender의 투과율, 이탈 각 등의 측정기술은 중성자 유도관의 중성자 빔 특성 평가, 다양한 중성자 분광 장치들의 특성 평가 등에 활용될 것이다.

참고 문헌

1. G. E. Bacon, Neutron Diffraction, 3rd Edition, Clarendon press, Oxford(1975)
2. B. Jarrot, "Utilization of neutron guide tubes for neutron inelastic scattering", Proceeding of Instrument for neutron inelastic scattering research, IAEA, Vienna 1-5, DEC(1969) 225
3. D.F.R. Mildner, Nuclear Instruments and Methods, 200 (1982) 167-173
4. B. Alefeld, Christ J. JUL-294-NP, 1965
5. A. Schebetov, et al, Nuclear Instruments and Methods, A432 (1999) 214-226
6. O. Elsenhans, et al, Thin Solid Films, 246(1994) 110
7. Peter Boni, Physica B 234-236 (1997) 1038 - 1043
8. J. Suzuki, et al, Proc. of ICANS-XV (2000) 547
9. T. Ebisawa, et al, Proc. of ICANS-XV (2000) 566
10. Th. Krist, et al, Physica B, 213&214 (1995) 939
11. F. Mezei, Commun. Phys. 1 (1976) 81
12. C. F. Majkrzak, Physica B, 213&214 (1994) 904
13. B. Ballot, et al, SPIE 1738 (1992) 159
14. O. Elsenhans, et al, SPIE 1738 (1992) 130
15. O. Elsenhans, et al, Thin Solid Films 246 (1994) 110
16. J. B. Hayter and H. A. Mook, J. Appl. Cryst. 22 (1989) 35
17. P. Boni, et al, Proc. ICANS-XIII and ESS-PM4, ed. G.S. Bauer and R. Bercher, Vol 1, 279
18. D. Clemens, et al, Physica B 213&214 (1995) 942
19. D. Clemens, et al, Physica B, 234-236 (1997) 1049
20. T. E. Mason, et al, Can. J. Phy. 73 (1995) 697
21. J. Mesot, Laboratoty for neutron scattering ETH & PSI annual progress report 1995, LNS, Vol 181 (1996) 59
22. I. N. Goncharenko, et al, Physica B234-236 (1997) 2103
23. F. Mezei, SPINE 1738 (1992) 107

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-2763/2004					
제목 / 부제		중성자 supermirror V-bender 특성 평가			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		신은주			
연구자 및 부서명		성백석, 이정수, 홍광표, 최병훈, 이창희			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004
페이지	63 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(O), 대외비(), — 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)		<p>중성자 supermirror는 중성자를 손실 없이 수십 미터까지 유도할 수 있는 중성자 유도관이나 중성자빔을 분리하거나 또는 방향을 바꾸어 주는 중성자 bender 등의 제작에 이용된다. 이러한 장치들은 첨단 중성자 분광장치의 핵심부품으로 이용된다. 본 보고서는 중성자 supermirror 및 중성자 유도관의 기본 원리에 소개하고, 중성자 supermirror로 제작된 중성자 V-bender의 중성자 빔 특성 평가 결과를 소개함으로써, 후일 냉중성자원 개발 및 첨단 중성자분광장치 개발에 도움을 주고자 한다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)		중성자, supermirror, V-bender, 하나로, 중성자 유도관, 중성자분광장치			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2763/2004					
Title / Subtitle		Characterization of Neutron Supermirror V-bender			
Project Manager and Department (or Main Author)		E. J. Shin			
Researcher and Department		B. S. Seong, J. S. Lee, K. P. Hong, B. H. Choi and C.-H. Lee			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2004
Page	63p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size	26 Cm.
Note					
Classified	Open(O), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	State-of-the report	Art
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)		<p>Neutron supermirror is used not only for neutron guide tubes that their make it possible to transmit neutrons for long distance with low losses in intensity but for neutron benders used as a beam splitter. These devices are of main components of advanced neutron diffractometer or spectrometer with cold neutrons.</p> <p>In this report, the basic principles and applications of neutron guide tube and neutron supermirror as well as the performance test results of neutron V-bender were introduced. These informations will be used for the development of advance cold neutron spectrometers in the future.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		neutron supermirror, V-bender, neutron spectrometer, neutron guide, HANARO			