2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KSTAR NBI Test Stand를 위한 저온흡착패널의 설계와 제작

Design and Fabrication of the Cryosorption panel for KSTAR NBI Test Stand

박미영, 인상렬, 김계령, 오병훈

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

현재 한국원자력연구소에서는 KSTAR NBI 가열장치 개발에 필요한 이온원 및 빔라인 부품의 시험을 위하여 KSTAR NBI Test Stand를 제작 중에 있다. Test stand에서 빔 인출 시 안정한 빔 수송을 위해 요구되는 배기계의 배기속도는 약 5.0×10^5 L/sec이다. 이와 같은 대용량의 수소를 배기하기 위하여 극저온 흡착 펌프(Cryosorption)를 설계하고 제작 중에 있다. 제작될 펌프의 크기는 약 2.0m(W)×2.0m(H)×0.15m(D)으로 2 set가 제작되어 NBI 빔용기의 양편에 각각 설치될 예정이다. 수소의 배기를 담당하는 저온 패널은 전체 넓이가 2×1.75m×1.75m로, 단위 면적당 약 1×10^5 L/s·m^2의 배기 성능을 가질 것으로 예상된다. 본 논문에서는 구체적인 펌프 설계 사항을 제시하고, 제작에 관한 몇 가지 문제점에 대해 논의하였다.

Abstract

Test Stand for KSTAR NBI is now fabricating to test the ion source and beamline component for development of the KSTAR NBI heating system at KAERI. Required pumping speed for stable beam transportation is about 5.0×10^5 L/s at this system. On this purpose, cryosorption type pumps (2 sets) were designed and they are now fabricating. The size of the pumps is 2.0m(W)×2.0m(H)×0.15m(D), and they'll be installed at both sides of the NBI beam chamber respectively. The area of the cryopanel pasted with activated carbon is 2×1.75m×1.75m, and it'll be expected to have the pumping speed of 1×10^5 L/s·m^2. Here we explained the detail design parameters, and discussed several difficulties in fabricating the pump.

1. 서론

최근 핵융합 연구가 대형화되면서 요구되는 중성빔의 에너지 및 빔 인출 시간이 증가하고, 이를 위해 기체 도입 유량 역시 증가하였다. 그러므로 빔 수송 중의 재전리 손실을 최소화하기 위한 대용량 고속 배기장치가 필수적이다. 현재 많은 대형 장치에서 대용량의 수소를 배기하기 위하여 저온 응축 펌프(Cryo condensation pump)를 채택하고 있다. 하지만 장치의 크기가 커지고 복잡해짐에 따라 NBI와 같은 열부하가 큰 환경에서 액체 헬륨을 사용해야 하는 응축형 펌프는 설치 및 사용이 힘들고 유지비가 많이 드는 단

점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 대형 공간 시뮬레이션 장치와 같은 장치에서 저온 흡착 펌프를 채택하고 있으며, NBI 장치에서도 적용이 되고 있다.[1-2]

KSTAR에서는 플라즈마 가열과 전류 구동 및 다양한 전류밀도 분포 실험을 위하여 그림 1과 같은 중성빔 입사장치 3개 라인을 계획하고 있다. 1개의 빔라인은 3개의 이온원으로 구성되며, 빔라인당 8 MW의 중성빔이 토카막 내의 플라즈마로 공급될 예정이다.

현재, 위와 같은 KSTAR NBI 가열장치 개발에 필요한 이온원 및 빔라인 부품들의 시험을 위하여 1개 이온원과 그외 빔라인 부품으로 구성된 'KSTAR NBI 장치 Test Stand'를 제작 중에 있다. 본 논문에서는 test stand에서 빔 인출 실험 시 진공배기를 위한 저온 흡착 펌프의 상세 설계 내용을 설명하고 배기성능을 고찰하는 한편, 제작 시 문제점이 되는 것에 대해 논의하였다.

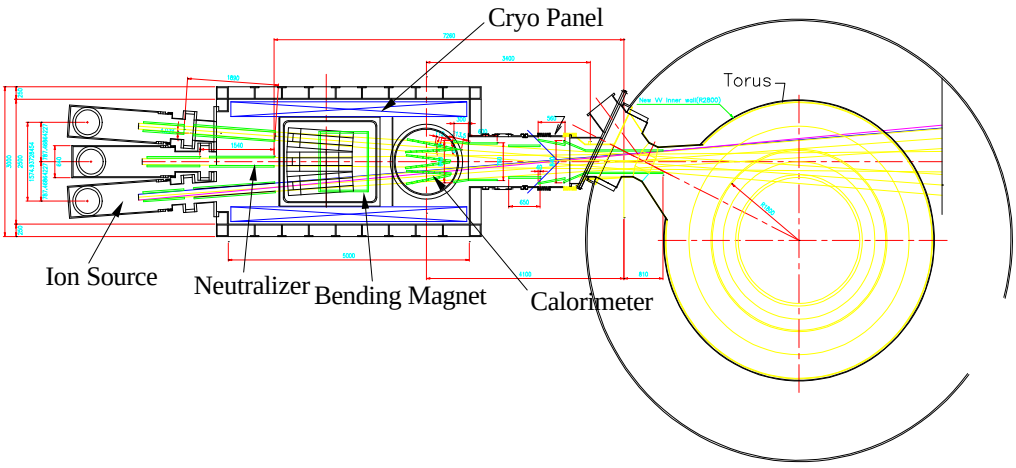

그림 1. KSTAR NBI 장치 구성도.

2. 설계 및 제작

그림 3은 제작될 펌프 본체의 구조도이다. 펌프는 기본적으로 20K 이하의 온도로 냉각되어 수소 기체의 배기를 담당하는 냉각 패널(cryopanel), 패널을 주변의 300 K 복사열로부터 차단하기 위한 열차폐(thermal shield)와 배플(baffle) 등으로 구성된 펌프 본체와 이들의 냉각을 위한 상용의 G-M 냉동기로 구성된다. 패널의 냉각은 냉동기의 2nd stage에서 담당하며, 열차폐 및 배플은 냉동기의 1st stage 및 보조적으로 액체질소를 공급하여 80K로 냉각된다. 그림 2는 NBI 진공함 내에 설치된 펌프 본체 및 냉동기의 위치를 보여준다.

(1) 설계 요구조건

NBI 정상 운전 상태를 위한 진공 배기계의 요구조건은, 중성화실 및 빔 용기 내 각 부분의 압력, 이온원 및 중성화실에 도입되는 수소 유량, 각종 부품들에 의한 콘덕턴스, 빔손실율, 이온원에서의 이온화율 등에 의해 결정된다.[1] 표 1은 이러한 요소 등을 고려하여 입자 평형 방정식으로부터 test stand에 요구되는 펌프의 배기 성능을 구한 결과이다.

표 1. NBI Test Stand 진공 배기계 요구 조건.

Pumping Requirement				
Pulse Duration (sec)	Normal Throughput (mbar ℓ/s)	Operating Pressure (Beamline, mbar)	Pumping Speed (L/s)	Pumping Capacity (mbar ℓ)
300 max.	25	~ 3×10^{-5}	5×10^{5}	7500 max.

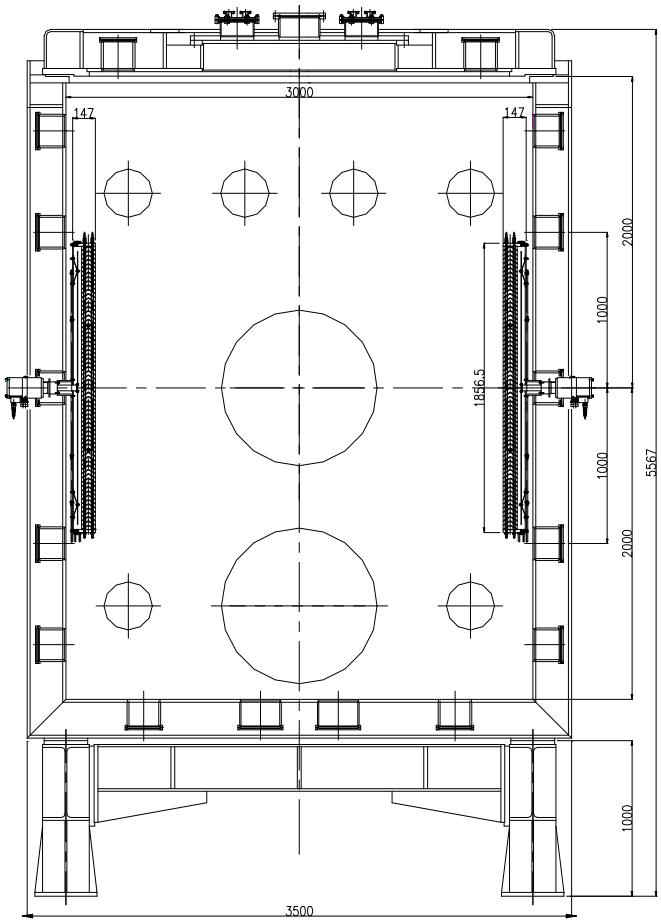

그림 2. NBI 대형 진공함 내의 Cryosorption Pump의 위치.

(2) 흡착 펌프의 설계

가)쉐브론 배플[3]

배플은 냉각패널의 온도를 20K이하로 유지하기 위하여 실온의 복사열을 패널로 유입되는 것을 차단하기 위하여 패널의 전면에 설치된다. 한편, 배플의 존재는 기체 역시 차단하기 때문에 패널의 배기속도가 줄어들게 된다. 그러므로 배플은 패널의 열부하를 최대한 줄이는 동시에 충분한 수소 배기속도를 가지도록 설계하는 것이 중요하다.

Monte Carlo Simulation 방법으로 여러 가지 쉐브론 모델에서의 복사열 통과확률을 계산한 바에 의하면[3], 입자의 통과확률은 표면의 흡착계수와 쉐브론 날의 기하학적 구조 등에 따라 큰 차이를 나타낸다. 만약 날

사이의 간격이 벌어져 있으면, 배플에 한번도 충돌하지 않고 통과하는 입자들이 생겨나 복사열의 통과가 크게 증가하게 되므로, 그림 3에 보는 바와 같이 날들 사이의 간격이 약 0.5 mm정도 겹치도록 설계하였다. 그리고 쉐브론 날의 각도가 120°일 때, 흡착계수가 0.0에서 0.9로 변할 때 통과확률은 0.275에서 10^{-3} 대로 낮아져, 복사열을 차단하기 위하여 배플 표면을 흑화처리를 하는 것이 필수적이다. 흑화처리 방법으로 알루미늄 양극산화처리(anodizing)를 하며, 이에 대하여 다음 문항에서 좀더 자세히 논의될 것이다.

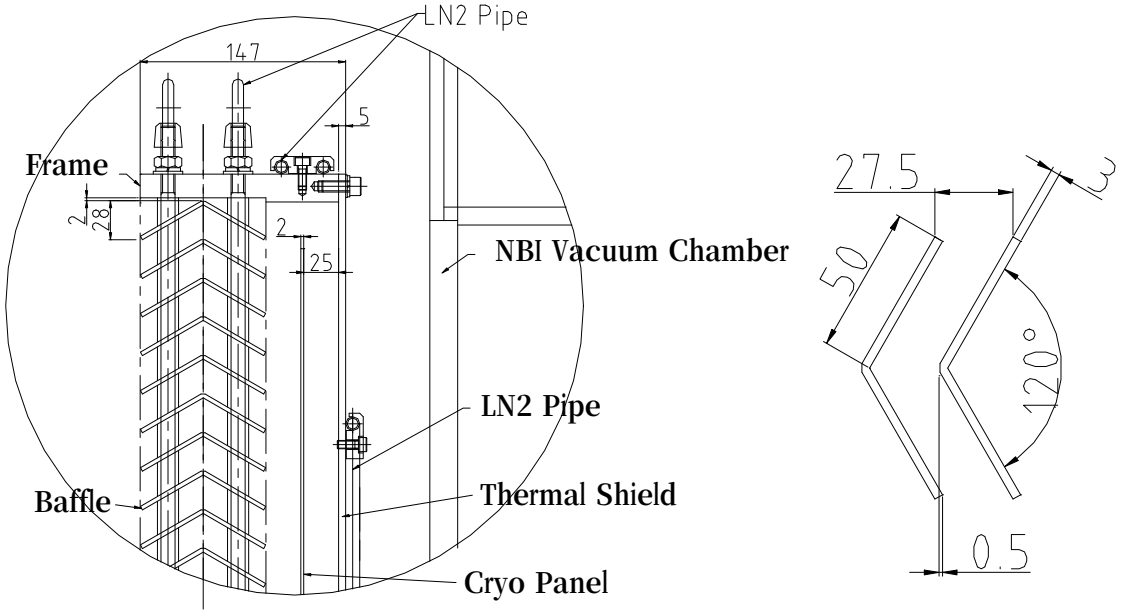

그림 3. NBI Cryosorption Pump의 상세 구조도.

나)패널

금속판 위에 부착된 수소 흡착체는 20K의 온도로 냉각되어 표면에 수소 기체가 저온 흡착되어 용기 내의 기체를 배기시킨다. 그림 4는 Monte Carlo 방법에 의해 쉐브론의 수소기체에 대한 흡착계수를 0.1, 각도를 120° 로 하였을 때 패널(활성탄)에서의 기체 배기 확률 및 수소기체에 대한 배기 속도를 계산한 것이다. 활성탄의 흡착계수가 증가할수록 배기속도가 증가한다. 만약 활성탄의 흡착계수를 0.7 0.9 정도라 한다면 [1], 제곱평방미터 당 패널의 배기속도는 약 1.0×10^{5} L/s ·m^2이며, 따라서 제작되어야 할 패널의 넓이는 최소 2×2.5 m^2가 되어야 한다. 또한, 패널이 15K 20K의 온도로 유지되는 약 7000sec동안 활성탄에 흡착되는 수소의 양은 약 2.0×10^{4} mbar ·L/m^2로[6] Test stand에서 요구되는 배기용량 7500 mbar ·L를 충분히 만족할 수 있다.

한편, 용기 중의 수소를 배기하기 위하여 패널(활성탄)의 온도를 20K로 내리는 것이 펌프의 성능에 도달하는 주요 관건이라 할 수 있다. 현재 설계된 펌프의 패널의 냉각은 G-M 냉동기의 2^{nd} stage에서 전담하고 있어, 패널 전반에 걸쳐 온도차가 발생할 것으로 생각된다. 그렇기 때문에 펌프 본체 전반에 가해지는 열부하를 최소화 하기 위한 방법 중 한가지로 배플 전면을 제외한 나머지 본체 주위에 열 절연층(thermal

insulator layer)을 삽입할 예정이다.

다) 재료의 선택

금속의 열전도도는 상온에서 저온으로 내려갈수록 나빠지며, 재료의 순도에 따라서도 큰 차이가 나며 이는 극저온으로 내려갈수록 더 두드러진다. 그러므로 패널 및 배플과 열차폐의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 재료의 순도는 적어도 99.9% 이상이 되어야 한다. 패널의 재료는 99.95%의 고순도 무산소동(OFHC), 배플 및 열차폐로는 순수 알루미늄(A1050)을 사용하며, 펌프 본체를 지지하는 역할을 하는 프레임은 강도가 큰 알루미늄 합금(A6061)으로 제작된다. 그리고 펌프 본체의 열부하를 줄이기 위하여 재료의 표면은 방사율이 가능한 작아야 한다. 패널로 유입되는 열부하를 1 W/m^2 대로 유지하기 위하여 배플의 흑화면과 활성탄 부착면을 제외한 모든 표면의 방사율은 0.1을 유지하도록 한다.

한편, 펌프의 가장 핵심적인 역할을 하는 부분 중 하나인 수소 기체의 흡착체로 활성탄(activated carbon)이 사용되며[5], 금속 패널과 활성탄을 접착하기 위한 접착제로는 몇 가지 제품의 열순환에 대한 접착력 테스트를 통하여 Thermoguss2000(Klebchemie Co., Germany)을 선정하였으며 이에 대하여 아래에서 좀 더 자세한 설명을 할 것이다.

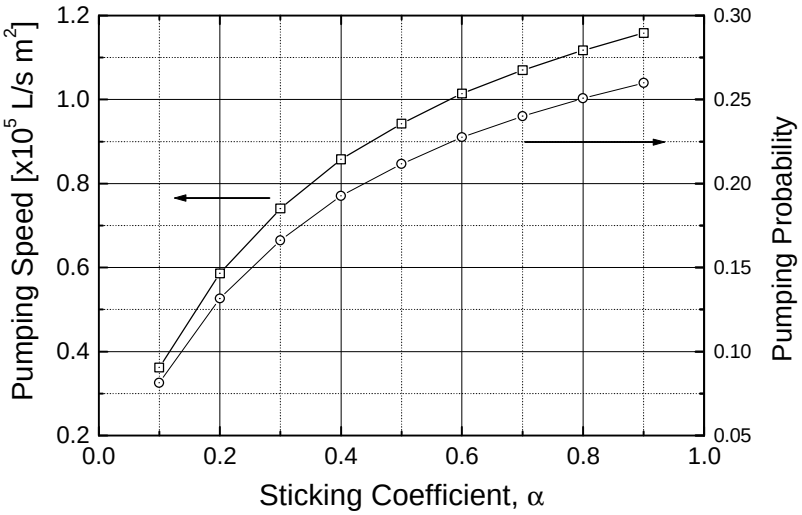

그림 4. 몬테카를로 계산에 의한 흡착펌프의 예상 배기 속도 곡선.

3. R&D

저온 흡착 패널을 제작하는 데 있어서 문제점 중 두 가지는 활성탄을 어떻게 냉각 패널에 코팅할 것인가[4] 하는 것과, 최적의 배플 양극산화 조건을 찾는 것이다. 먼저 접착제 및 활성탄의 접착력이 펌프의 온도 20K에서 견딜 수 있고, 20K 300K의 thermal cycle에 견딜 수 있는 최적의 금속/접착제/활성탄을 선정하고, 접착력을 증가시키기 위한 금속 표면 처리방법을 찾아보았다. 한편, 알루미늄 배플을 다양한 양극산화 방법으로 샘플을 제작하여 복사열의 흡수율을 비교하여 최적의 산화방법을 찾았다.

(1) 접착제 및 활성탄의 thermal cycle에 따른 접착력 테스트

표 2는 무산소동 샘플 위에 4가지의 접착제를 채택하여 활성탄의 thermal cycle에 따른 접착 테스트를 한

결과이다. 무산소동 판의 크기는 4×5 cm^2이며, 표면을 입자의 크기가 다른 두 종류의 사포로 거칠기를 다르게 하였다. 접착제 도포 후 각 제품에서 제시한 경화조건으로 경화하였다. 샘플을 77K 380K 온도 영역에서 냉각 및 가열을 100회 행하였으며, 테스트 시 활성탄은 16×35 mesh의 CGF(동양탄소, Korea) 타입을 사용하였다.

먼저 Aremco 사의 Aremco543은 접착력은 상당히 좋지만, 300℃ 이상에서 경화를 하여야 하므로 1.75m×1.75m의 넓은 패널에 사용하기에 어려움이 있다. 그리고 Aremco805와 571은 실온에서의 접착력은 좋으나, 10 20번 정도의 thermal cycle 후에 접착제가 표면으로부터 거의 떨어졌다. Thermoguss2000은 도포 시 접착제 표면이 공기 중에서 빨리 경화되어 활성탄을 부착하기에 어려움이 있었지만 분말과 액상의 혼합 시 액의 비율을 늘임으로써 해결할 수 있었고, 100회 thermal cycle 테스트를 완료한 후에도 금속/접착제/활성탄의 접착력이 우수하였으므로 펌프 제작에 사용하기로 결정하였다.

샘플을 77K 온도까지 냉각 시켰을 때, 평활한 표면일 때보다 거칠기를 주었을 때 접착제와 금속 판과의 접착력이 더 좋았으며, 여러 가지 조건에서 ceramic blasting 처리된 무산소동 샘플을 만들어 마찬가지의 방법으로 thermal cycle 테스트를 하여 이를 확인하였다. 따라서 제작될 패널은 접착제 도포 전 ceramic blasting공정으로 거칠기를 줄 것이다.

한편, 접착제 및 활성탄의 접착력은 금속 표면의 세정 상태 뿐만 아니라 도포된 접착제의 두께에 따라 또는 기계적인 충격에 의해 쉽게 떨어지는 경향이 있어 좀더 효과적인 접착제 및 활성탄의 도포 방법에 대한 실험이 요구된다.

표 2. 접착제의 열순환에 따른 접착 성능 테스트 결과.

#	Adhesive		작업성[1]	습식성[2]	접착성[3]		내구성[4]		최종 결과
					Cu/접착제	접착제/활성탄	Cu/접착제	접착제/활성탄	
1	Aremco543		C*	B	A	A	A	B	B
2	Thermoguss2000	2:1[5]	C	C	A	C	B	B	C
		1.5:1	A	B	A	A	A	B	A
3	Aremco805		A	A	A	A	C	C	C
4	Aremco571		A	B	A	A	B	C	C

1: 접착제 코팅 및 경화시 작업성 고려, 2: 접착제가 스며드는 정도, 3: 경화를 완료하였을 때,

4: 100회 열순환 테스트를 완료하였을 때, 5: 혼합비(powder:liquid)

* A: Good, B: Normal, C: Bad

(2) 배플의 양극 산화면의 복사열 흡수 테스트

배플의 복사열 흡수 능력은 펌프의 배기성능에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 최적의 배플 흑화 처리 공정을 찾기 위하여 다양한 공정을 거쳐 알루미늄(A1050) 양극산화 샘플을 제작하였다. 표 3은 제작된 샘플들을 일정 거리 떨어진 히터에 의한 복사열로 실온에서부터 가열하면서 온도 상승률을 측정하여, 상대적인 성능에 의한 순위를 얻은 결과이다. 주어진 실험결과에 의하면, 흑화 처리를 전혀 하지 않은 알루미늄 판에 비하여 어떠한 방법으로든 흑화 시킨 판이 온도 상승율이 높았다. 그리고 염료처리를 하지 않은 산

화막의 두께가 두꺼워 질수록 색깔은 좀더 짙은 흑색을 띠었고, 흡수 성능이 흑색을 띨수록 좋음을 알 수 있다. 페인트를 도포한 것은 실온에서 복사열 흡수 성능은 뛰어나지만, 그 자체의 기체 방출률이 높아 펌프에 적용되기에는 부적합할 것이다. 그러므로 배플 흑화처리의 방법으로 60 ㎛이상의 산화막 두께를 가지는 경질 아노다이징을 채택하였다.

한편, 배플은 용기 내부의 복사열을 흡수하는 한편 그 자체로 방사열을 낸다. 이러한 흡수율과 방사율은 배플 자체의 온도, 표면의 광택 등의 영향 뿐만 아니라, 흡수되는 열의 온도, 파장 등에 의한 영향들의 복합적인 현상으로 나타난다. 따라서 펌프 가동 시와 똑 같은 조건 하에서 흑화 면의 정확한 흡수 및 방사율을 측정하는 것은 쉽지 않으며, 이에 대하여는 좀더 개선된 실험이 필요할 것으로 생각된다.

표 3. 여러 양극산화 샘플의 복사열의 흡수성능 테스트 결과.

Sample	Process	Color	Thickness(㎛)	Absorption(ranking)
A	I+II+III	Black/Grey	30	4
B	III	Grey	30	5
C	0+II	Black	15	6
D	III	Grey/Black/Brown	60	3
E	III	Grey/Brown	30	7
F	Paint(cold)*	Black	-	1
G	Paint(hot)	Black	-	2

0: Normal Anodizing, I: 1-step coloring(자연발색법), II: 염료 침투, III: Hard Anodizing

*: 페인트 후 실온에서 건조시킨 것(cold)과 온도를 가한 것(hot)

4. 결론

KSTAR NBI Test Stand 진공 시스템의 요구에 적합한 저온 흡착 펌프의 설계를 완료하였다. 흡착패널의 총 면적은 $2\times3.0\ m^2$이며, 예상되는 펌프의 배기속도와 배기량은 약 5.0×10^5 L/s와 7500 mbar·L으로 시스템의 요구를 충분히 만족시킬 수 있다. 한편 펌프 제작 상의 문제점인 접착제 및 활성탄 도포와 배플 흑화 처리 공정에 대한 R&D를 수행하였다. 앞으로 이 부분에 대해서 좀더 펌프 동작 환경에 근접한 조건에서 추가적인 실험이 요구된다.

Reference

[1]오병훈 이외, "KSTAR 중성빔 입사 장치 배기계통 설계", 한국진공학회지, 1999

[2]Y. Oka, et al, "Development of cryosorption pump for neutral beam injector", Fusion Eng. Des., 31, 89 (1996)

[3]S. R. In et al, "Transmission probability of the chevron baffle", Korea Vac. Soc., 2001,
to be published

[4]D. Perinic, et al, "Development of cryosorption panels for cryopumps", Adv. in Cryogenic Eng., V39, 1553(1994)

[5]D. W. Sedgley, "Development and application of charcoal sorbents for cryopumping fusion devices", Fusion Eng. Des., 10, 217(1989)

[6]**인상렬 이외**, “Design concept of the cryopumping system for the KSTAR NBI", 18th Symposium of Korea Vac. Soc.(Seoul Natl. Univ., 24th Feb., 2000)