'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 BNCT 여과기의 냉각 설계 및 검증 시험

Cooling Design and Verification Test for HANARO BNCT Filter Unit

채희택, 황승렬, 임인철, 전병진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고속 중성자와 감마선을 차폐하고 열 중성자를 투과시키는 여과기는 하나로 BNCT 장치의 핵심적인 부분이다. 여과기는 원통형의 알루미늄 틀에 고속 중성자 차폐를 위한 규소 단결정과 감마 차폐를 위해 비스무쓰 단결정을 채운 구조로 되어 있다. 이 여과기를 액체 질소 온도로 냉각시키면 고속 중성자와 감마 준위는 변하지 않으면서 열중성자속은 2배 정도로 증가시킬 수 있다. 이에 따라 여과기를 액체 질소 온도로 유지하기 위해 설치되는 진공층에서의 열전달 특성을 평가하고 진공층에 대한 기본적인 설계 사양을 결정하였다. 또한 모의 여과기를 제작하여 설계 개념을 검증하는 시험을 수행하였으며 시간에 따른 여과기의 온도 변화와 액체 질소 소모량의 관계를 규명하였다. 이와 같은 결과는 BNCT 여과기가 하나로에 설치되었을 때 냉각 특성 자료로 이용될 것이다.

Abstract

The filter to shield fast neutron and gamma except thermal neutron is the key component in HANARO BNCT facility. The BNCT filter unit is made of the single crystals of silicon and bismuth in a cylindrical aluminum case. If the filter is cooled to the LN(liquid nitrogen) temperature, it is possible to increase the thermal neutron by the factor of two. A thin vacuum gap and a liquid nitrogen gap were introduced into the outer region of the crystals to maintain the crystals at the LN temperature. In this paper, the basic design specifications were determined for the vacuum gap and the heat transfer characteristics were evaluated. Cooling tests using a mock-up filter unit were performed to verify the design concepts of the filter. In these tests, the variations of filter temperature, pressure in the vacuum gap and consumption rate of liquid nitrogen were measured. The verification test results will be useful to provide the functional data of BNCT filter unit which will be set up in the HANARO.

1. 서론

BNCT(Boron Neutron Capture Therapy)는 붕소의 중성자 흡수를 이용한 암 치료 장치로 하

나로(HANARO, High-Flux Advanced Neutron Application Reactor)의 수평 조사공 가운데 하나인 IR Beam Tube에 설치하기 위한 연구가 진행 중에 있다[1]. 하나로에서의 BNCT는 열중성자를 이용하는 것으로 고속 중성자와 감마를 선별적으로 차폐하여 적합한 열중성자를 얻을 수 있는 여과기(Fast Neutron and Gamma Filter)가 필요하다. 여과기 재질로는 열/고속 중성자의 비를 높이기 위하여 규소(Silicon) 단결정과 감마 차폐 성능이 좋으면서 2차 감마 생성을 적게 하는 물질로 비스무트(Bismuth)를 사용한다. 규소와 비스무트를 액체 질소 온도로 유지하면 고속 중성자와 감마는 같은 준위를 유지하면서 열중성자는 약 2배 이상 높은 값을 얻을 수 있다[2]. 이에 따라 여과기를 저온 상태로 유지할 수 있도록 진공 단열층을 도입하고 액체 질소로 계속 냉각하는 방식을 채택하였다. 이러한 여과기의 냉각 설계 사양을 결정하고 검증하기 위하여 진공층에서의 열전달 특성을 평가하고 모의 여과기를 제작하여 여과기 온도, 진공층의 진공도 및 액체 질소 소모량을 측정하는 실험을 수행하였다.

2. 여과기 진공층에서의 열전달 특성

2.1 복사 열전달

진공 열 차폐를 통하여 들어오는 열량은 진공층의 진공도, 표면적, 표면의 방사율(emissivity), 진공층을 유지하기 위한 간격체에서의 열전달로 결정된다. 넓이에 비하여 간격이 충분히 좁은 진공층을 통한 열전달은 복사 열전달과 분자 운동에 의한 열전달의 합이다. 복사 열전달은 다음 식으로 표시된다.

$$q = \frac{A\,\sigma\,(T_o^4 - T_i^4)}{1/\varepsilon_o + 1/\varepsilon_i - 1} \qquad (1)$$

여기서, q = 열전달률,

A = 표면적,

σ = Stefan-Boltzman 상수,

T_o, T_i = 진공층 바깥 면과 안쪽 면의 절대 온도,

ε_o, ε_i = 진공층 바깥 면과 안쪽 면의 emittance

목표 온도를 유지하면서 복사 열전달을 줄이는 방법은 표면적을 최소로 할 수 있는 구조로 하고, emittance가 작도록 하는 것이다. 정해진 부피에 대하여 표면적을 줄이는 방법은 외부 구조를 단순화하는 것이며, 정해진 재료로 emittance를 줄이기 위해서는 표면의 거칠기를 최소화하는 것이다. 여과기 부분의 구조를 가장 단순화시키면 원통이 된다. 알루미늄의 경우 표면을 반짝일 정도로 닦으면 emittance가 0.04 - 0.06의 값을 가지며, 온도가 낮아지면 작아진다. 이에 비해 비스무트는 0.34, 규소 단결정은 이보다 더 크다. 진공층의 양면이 emittance가 1보다 훨씬 작은 알루미늄인 경우와 바깥 면은 알루미늄이지만 안쪽이 emittance가 훨씬 큰 비스무트나 규소일 경우에는 식(1)이 다음과 같이 근사된다.

$$q_{both} \simeq A_{both}\,\sigma\,\varepsilon\,(T_o^4 - T_i^4)/2 \qquad (2)$$

$$q_{one\text{-}sided} \simeq A_{one\text{-}sided}\,\sigma\,\varepsilon\,(T_o^4 - T_i^4) \qquad (3)$$

여기서 ε는 알루미늄의 emittance이다. 즉, 안쪽이 비스무트나 규소인 경우에는 양쪽이 알루미늄인 경우에 비하여 열속이 두 배이다. 이러한 면은 여과기의 앞, 뒷면으로서 전체 표면적의 약 20 %에 해당한다. 이렇게 하여 추정되는 복사 열전달률은 약 9 W이나 알루미늄 표면에 산화막이 형성되면 emittance가 훨씬 커지므로 복사 열전달은 이에 비례하여 증가할 것이다.

2.2 저밀도 기체에서의 열전도[3]

여과기의 갭은 주위 차폐체와 여과기 사이에 열전달을 차단하기 위하여 진공 상태를 유지한다. 그러므로 여과기 갭에서는 진공 상태의 열전달 메커니즘이 중요하다. 보통 저밀도 기체라 함은 기체 분자의 평균 자유 행정이 열전달 영역의 특성 길이와 비교하여 더 이상 작지 않은 상태를 말한다. 이 상태에서는 기체 분자 사이의 충돌로 인해 에너지가 전달되는 열전도를 적용할 수 없고 기체의 동특성이 중요해진다. 기체의 동특성 이론에 의하면 기체 분자의 평균 자유 행정(λ)은 다음 같은 식으로 구해진다.

$$\lambda = 2.27 \times 10^{-5}\ T/p \qquad (4)$$

여기서 T는 기체의 절대온도이고 기체 압력 p는 pascals 단위이다. 저밀도 기체가 있는 갭에서의 온도 분포는 그림 1과 같이 열전달 면 근처에서 급격한 온도 변화, ΔT를 보여준다. 이 같은 온도 변화는 기체의 평균 자유 행정이 열전달 특성 길이에 비해 크거나 비슷할 경우 분자간 충돌 없이 열전달 면에 도달하는 기체 분자에 의해 생긴다. 그림 1에 나타난 열전달 면 근처에서의 온도 변화, ΔT는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\varDelta T = \frac{2-\alpha}{\alpha}\ \frac{2\gamma}{\gamma+1}\ \frac{\lambda}{\mathrm{Pr}}\ \frac{T_1 - T_2 - 2\varDelta T}{L} \qquad (5)$$

여기서, α = accommodation factor

γ = ratio of specific heat = c_p / c_v = 1.4 for air

λ = mean free path of gas molecule

Pr = Prandtl number

L = characteristic length (gap width)

잘 가공된 알루미늄 표면의 경우 α=0.95 0.97 이다. 위의 식들을 이용하여 저밀도 기체의 전도에 의한 열전달율을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q = A\ k\ \frac{T_1 - T_2 - 2\varDelta T}{L} \qquad (6)$$

2.3 진공층의 두께 및 진공도

여과기 온도를 액체 질소 온도 상태로 유지하기 위한 적정한 갭의 크기와 진공도를 결정하기 위하여 식(5)와 식(6)을 이용하여 갭에서의 열전도율을 계산하였다. 위의 식들은 두 평판 사이의 갭에 대한 것이고 여과기의 갭은 원통형 갭이지만 각 파라미터의 영향을 살펴보기 위하여 평판에 대한 식을 적용하였다. 갭의 크기는 1mm에서 100mm 까지, 갭에서의 압력은 10^{-3} torr와 10^{-4} torr에 대해 계산하였으며 계산 결과는 표 1과 같다.

갭에서의 열전도율은 압력에 반비례 즉, 진공도에 비례하여 작아졌다. 식(4)에서 기체 분자의 평균 자유 행정(λ)이 압력에 반비례함을 생각할 때 예상할 수 있는 결과이다. 반면에 λ가 진공층 두께보다 클 때 두께의 영향은 거의 미미하였으며 진공층 두께보다 작아지면 영향이 나타났다. 이에 따라 여과기 진공층의 두께를 2mm, 압력을 10^{-4}torr 이하로 유지하도록 설계 사양을 결정하였다.

3. 여과기 온도 측정 시험

3.1 모의 여과기 및 실험 장치 구조

여과기의 구조는 그림 2와 같이 원통의 알루미늄 틀에 원통형의 규소와 비스무트 막대가 면

접촉을 하고 있다. 규소와 알루미늄 사이에는 액체 질소 갭과 진공층이 있고 비스무트 쪽과 양 단 플랜지에는 진공 갭만이 존재한다. 여과기 온도를 측정하기 위하여 K형 열전대를 비스무트 중앙 5cm 깊이에 설치하였다. 여과기 상부에는 계속적인 액체 질소 공급을 위하여 30L 용량의 dewar를 두고 여기에 액체 질소 수위계를 설치하여 시간에 따른 액체 질소 소모량을 측정하였다. 이와 함께 여과기와 dewar 연결관에 진공 펌프를 연결하여 진공 상태를 유지시켰으며 연결관과 여과기 규소 부분의 하단 갭에서 진공도를 측정하였다.

3.2 시험

모의 여과기에 대한 온도 측정 시험은 두 차례 수행되었다. 두 번째 실험에서는 여과기 양단 플랜지의 진공 갭을 통해 들어오는 열을 차단하기 위하여 superinsulation sheets(알루미늄 입자가 양면 코팅된 플라스틱 필름)를 양단 갭에 여러 겹 삽입하였다. 실험 시작 전에 진공 펌프를 가동하여 dewar 연결관의 진공도가 10^{-4}torr 정도에 도달하면 dewar에 액체 질소를 채우고 처음에는 30분 간격으로 2시간동안 측정하고 다음에는 2 3시간 간격으로, 평형 상태에 도달한 후에는 4시간 간격으로 온도 변화, 진공도 및 dewar 수위를 측정하였다. 온도는 비스무트 내부, 여과기 표면 및 실험실 대기 온도를 측정하였다.

3.3 실험 결과 및 논의

그림 3은 두 실험에서 측정된 여과기의 비스무트 부분 온도 변화이다. 1차 실험에서 온도가 감소하다 다시 증가하는 세 경우는 dewar에 액체 질소 충전이 이루어지지 않아 생긴 결과이다. 이로 인한 지연 시간을 포함하여 1차 실험에서 비스무트 온도가 평형 상태에 도달하는데 걸린 시간은 약 8일이었고 여기까지의 액체 질소 소모량은 약 350L이다. 이 후 평형 상태의 비스무트 온도는 평균 -95℃ 정도를 유지하였으며 여과기 표면 온도는 14.9℃, 대기 온도는 21.6℃로 6.7℃의 온도차를 유지하였다.

2차 실험에서는 초반의 온도 감소 경향이 1차 실험과 다르며 실험 시작 4일 후에는 약 30℃ 정도의 갑작스런 온도 강하가 있었다. 이는 액체 질소에 의한 냉각으로 내부 알루미늄 틀이 수축하면서 규소와 비스무트의 접촉 상태를 좋게 하여 생긴 결과로 추정한다. 2차 실험에서는 비스무트 온도가 약 5일 후에 -100℃ 부근에서 평형 상태에 도달한 것으로 보이며 이 후에도 약간씩 감소하여 20일이 지난 후에는 -113℃까지 감소하였다. 평형 상태까지의 액체 질소 소모량은 약 200L였다. 평형 상태에서의 비스무트 평균 온도는 -108℃, 여과기 표면 온도는 13.1℃, 대기 온도는 19.4℃로 6.3℃의 온도차를 유지하였다. 1차 실험과 이러한 차이는 다른 실험 조건의 변화가 없었으므로 superinsulation의 삽입에 따른 변화로 이해된다. 평형 상태에서의 액체 질소 소모율은 1, 2차 실험에서 각각 1.75L/hr와 1.63L/hr였으며 이를 열전달율로 환산하면 78W와 73W가 된다. 여과기 진공층에서의 복사와 전도에 의한 열전달율을 약 11W로 추정하였으므로 dewar에서의 자연 증발을 6W 정도로 가정하면 약 6배의 차이를 보인다. 이러한 차이는 진공층의 알루미늄 표면 상태에 따른 복사 열전달의 차이에 기인한 것으로 추정된다. 실제로 모의 여과기 제작 과정에서 수차례의 수정 용접으로 알루미늄 표면이 많이 산화되었으며 이로 인해 표면 방사율이 증가하였을 것으로 생각한다. 그러므로 실제 여과기를 제작할 때에는 복사 열전달을 최소화하기 위하여 알루미늄 표면에 산화막이 생기지 않도록 각별한 주의가 필요하다.

여과기에서 액체 질소 갭은 단일 원통인 규소 부분만을 감싸고 있으므로 비스무트 부분은 규소 결정으로의 열전도를 통하여 냉각된다. 열전대는 9개의 조각으로 나뉜 비스무트의 플랜지 쪽에 심어져 있어 측정 지점까지의 열전달 저항이 존재하므로 규소 부분의 온도는 평형 상태에서 액체 질소 온도(77K)를 유지할 것으로 추정된다. 여과기 내부의 온도 분포에 대해서는 추후 다차원 해석을 통하여 확인할 필요가 있다. 또한 하나로에 실제로 설치되는 BNCT 여과기에서는 온도를 측

정하지 않으므로 중성자 투과율의 변화를 측정하여 냉각 특성 변화를 간접적으로 추정할 계획이다.

4. 결론

고속 중성자와 감마선을 차폐하고 열 중성자를 투과시키는 여과기는 하나로 BNCT 장치의 핵심적인 부분이다. 여과기는 원통형의 알루미늄 틀에 고속 중성자 차폐를 위한 규소 단결정과 감마 차폐를 위해 비스무트 단결정을 채운 구조로 되어 있다. 이 여과기를 액체 질소 온도로 유지하기 위해 설치되는 진공층에서의 열전달 특성을 평가하여 진공층 두께를 2mm, 진공도를 10^{-4} torr 이하로 유지하기로 하였다. 또한 모의 여과기를 제작하여 냉각 설계 개념을 검증하는 온도 측정 시험을 2차에 걸쳐 수행하였다. 시험 결과, 비스무트 온도가 평형상태에 도달하는 시간은 1차 시험에서 8일, 2차 시험에서는 5일이었으며 최저 온도는 -95℃와 -113℃, 액체질소 소모율은 1.75L/hr와 1.63L/hr이었다. 이와 같은 결과는 BNCT 여과기가 하나로에 설치되었을 때 냉각 특성 자료로 이용될 것이다. 또한 액체 질소의 소모율이 예상치 보다 크게 나타났으며 진공층의 표면 상태에 따른 복사 열전달의 차이에 기인한 것으로 추정한다. 그러므로 실제 여과기를 제작할 때에는 복사 열전달을 최소화하기 위하여 알루미늄 표면에 산화막이 생기지 않도록 하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 전병진 외, "하나로를 이용한 암 치료 장치 개발", 한국원자력연구소 연구개발보고서, KAERI/RR-1677/96, 97-02.
2. B.C.Lee, B.J.Jun and J.B.Lee, "Preliminary Design for BNCT in the HANARO", Proceedings of the ANS Topical Conference on Radiation Protection & Shielding, 98-04.
3. J.P.Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, 1986.

표 1. 진공층 두께와 압력에 따른 열전도율 계산 결과

항목	압력 (torr)	λ (m)	진공층 두께(m)				
			0.001	0.002	0.01	0.05	0.1
ΔT (K)	0.001	0.032	110.6	109.7	103.1	79.3	61.6
	0.0001	0.321	111.4	111.3	110.6	107.2	103.1
열전도율 (W)	0.001	0.032	23.45	23.26	21.86	16.81	13.05
	0.0001	0.321	2.36	2.36	2.34	2.27	2.19

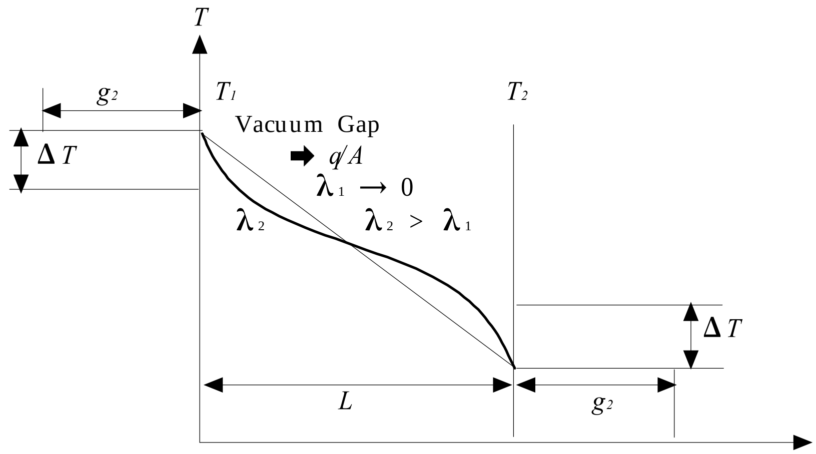

그림 1. 진공층에서의 열전도에 대한 평균 자유 행정의 영향

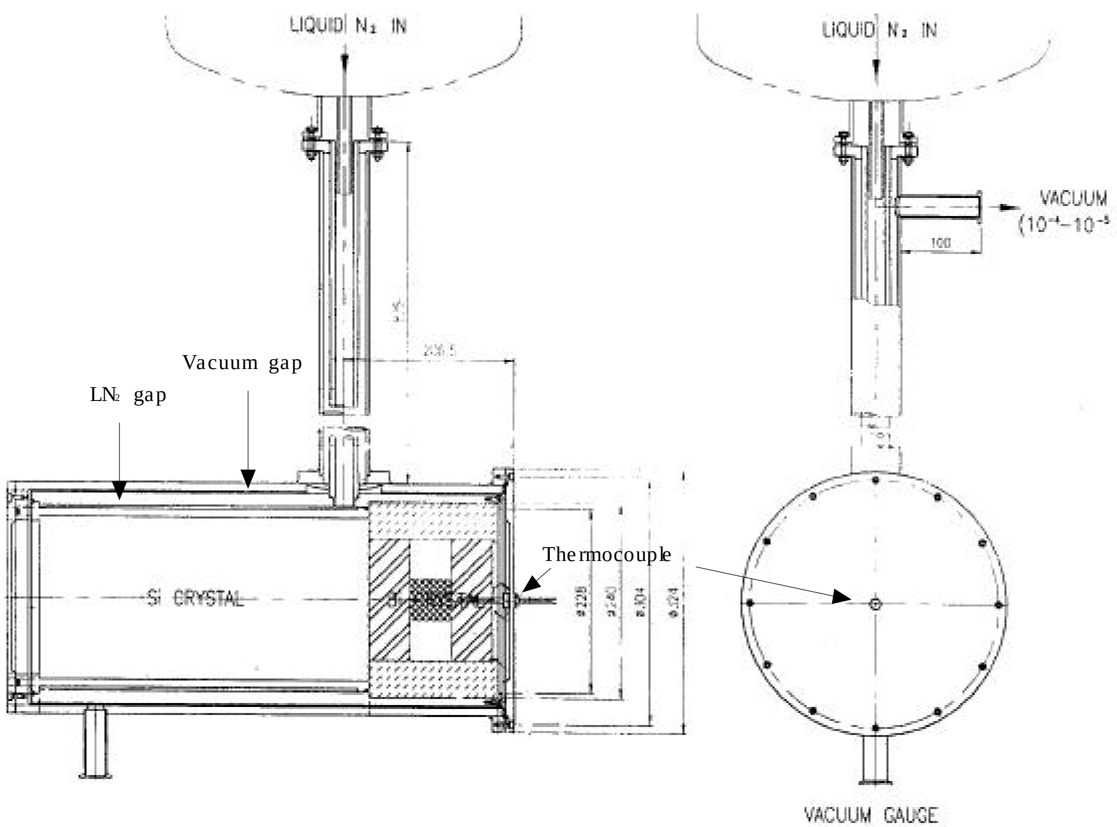

그림 2. 모의 BNCT 여과기의 온도 측정 장치 개략도

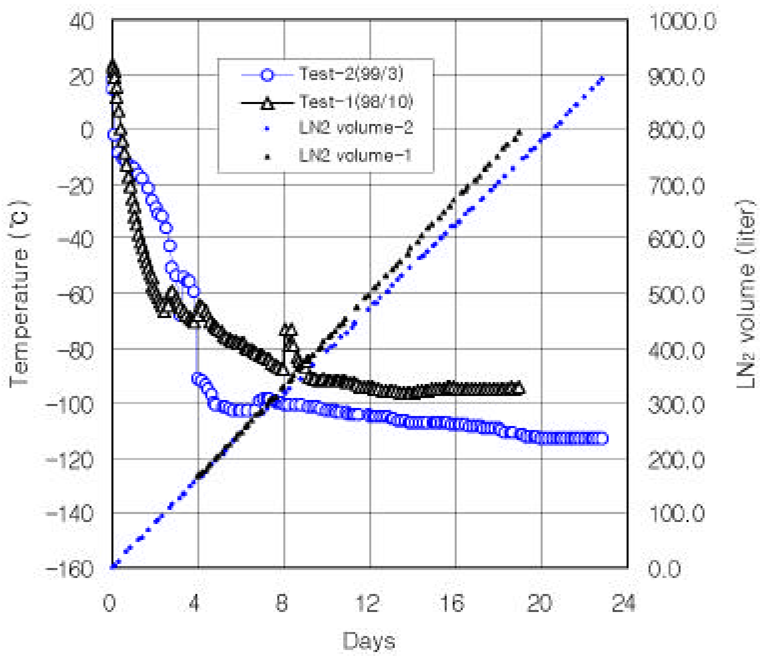

그림 3. **모의** BNCT **여과기 비스무트에서의 온도 변화 및 액체 질소 소모량**