2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

납-비스무스 핵파쇄 표적의 유량 감소 방안을 위한 injection Tube 의 도입

The Introduction of an Injection Tube for the Device of the Flow Rate Reduction at the Lead-Bismuth Spallation Target

조충호, 김용희, 송태영, 차재은
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가속기 구동 미임계 핵변환로는 1GeV 급 이상의 양성자 빔을 중핵원소 물질인 표적에 조사하여 생성되는 중성자를 원자로 운전에 필요한 중성자원으로 이용하기 때문에, 기존의 원자로와는 달리 핵파쇄 표적 시스템과 가속기 시설이 필수적으로 요구된다. 통상 1000MW_{th} 급의 실질적인 ADS 에서는 15-25MW 의 표적 시스템이 필요 불가결하다고 알려져 있지만, 빔 에너지의 60% 이상이 빔창 및 표적 시스템이라는 제한적인 공간에 열 축적되기 때문에 20MW 이상의 표적 시스템을 설계 하는 것은 쉽지않은 일이다. 본 연구는 20MW 급 LBE 표적시스템의 설계 변수 도출에 그 목적을 두고있다. 특히, 표적시스템의 유량 감소를 위한 방안으로 Injection Tube(분사관)를 도입함으로써, 표적시스템의 허용 빔 전류를 유지하면서 유량을 기존의 절반으로 줄일 수 있었다.

Abstract

A spallation target system is a key component to be developed for an accelerator driven system (ADS). It is known that a 15~25 MW spallation target is required for a practical ADS. The design of a 20 MW spallation target is very challenging because more than 60% of the beam power is deposited as heat in a small volume of the target system. In the present work, a numerical design study was performed to obtain the optimal design parameters for a 20 MW spallation target for a 1000 MW_{th} ADS. Especially, an injection tube was proposed for the reduction of the LBE flow rate at the target channel. The results of the present study show that a 30 cm wide proton beam with a uniform beam distribution should be adopted for the spallation target of a 20 MW power. When a simple LBE injection tube is employed, the LBE flow rate could be reduced by a factor of 2 without reducing the maximum allowable beam current.

1. 서 언

최근 가속기 분야의 급속한 기술 진보에 따라, 사용 후 핵 연료의 처리를 위해 가속기 구동 미임계 핵변환로(*A*ccelerator *D*riven *S*ystem, ADS)가 대두되고 있다. ADS 는 1GeV 급 이상의 양성자 빔을 중핵원소 물질인 표적에 조사하여 생성되는 중성자를 원자로 운전에 필요한 중성자원으로 이용하기 때문에, 기존의 원자로와는 달리 핵 파쇄 표적 시스템과 가속기 시설이 필요하다. 특히 핵 파쇄 반응 중 다량의 중성자원이 생성되어야 하기 때문에 표적 물질의 선택은 중성자원 생성율, 양성자 빔 조사에 의한 표적 손상 및 열 냉각 능력 등을 고려하여 선택되어야 한다.

ADS 는 시스템 여건상 핵파쇄 표적과 노심 냉각재 물질을 같은 종류로 사용하는 것이 바람직하며, Lead-Bismuth eutectic(LBE)를 표적 물질로 채택하였다. LBE 는 냉각이 간편하고 효율적이며, 중성자 흡수 단면적이 작고, 양성자 빔 조사에 의한 표적 자체의 손상이 없다. 또한 용융점이 125°C 로 낮기 때문에 낮은 온도에서 운전할 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 냉각재 폭발 및 화재 가능성이 적기 때문에 미임계로의 중성자원으로 적합하여 우선적으로 선정되었다.

빔창 물질은 수명과 관련된 부식, 방사선 손상 특성을 고려하여 접촉하는 액체금속인 LBE 와의 화학적 특성이 좋고, 방사능에 의한 기계적 특성이 좋은 ferritic/martensite 계통의 철금속인 9Cr-2WVTa 를 선정하였다.

핵 파쇄 표적 시스템의 설계에 있어서 주된 관건은 높은 에너지의 양성자 빔 조사에 의한 손상, 발생하는 열, 그리고 작용하는 기계적 하중등에 견딜 수 있으며, 시스템에 발생하는 열을 효과적으로 냉각시켜 줄 수 있는 LBE 유동을 제공하는 빔창의 형상 설계에 있다. 최근 LBE 표적 설계에 있어서 다양한 연구들이 발표되고 있다[1-4]. 그러나 이들 연구는 중성자원의 파쇄나 소규모 ADS 실험시설에 대한 연구에 초점을 맞추고 있다. 통상 1000MW_{th} 급의 실질적인 ADS 에서는 15-25MW 의 표적 시스템이 필요 불가결하다고 알려져 있지만, 빔 에너지의 60% 이상이 빔창 및 표적 시스템이라는 제한적인 공간에 열 축적되기 때문에 20MW 이상의 표적 시스템을 설계 하는 것은 쉽지않은 일이다.[5-9] 이러한 문제를 해결하기 위하여 Forschungszentrum Karlsruhe[10]는 세 개의 표적시스템을 병행하는 방법을 모색하고 있으며, MYRRHA project [11], X-ADS design[12]등은 빔창이 없는 표적 시스템을 고려하고 있다.

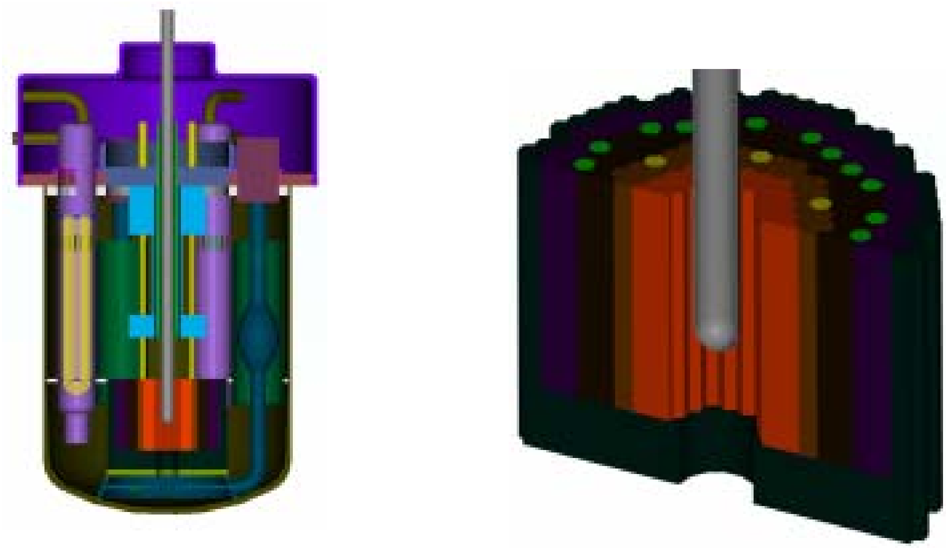
기존의 연구를 통하여, 20MW 급 LBE 표적시스템을 위한 설계 변수를 도출한 바 있다.[13] 그러나, 표적시스템의 유량이 너무 많아서 시스템 전체 유량의 10%에 육박하는 문제에 직면하게 되었다. 이는 냉각재의 Pumping Power 를 증가시키고, 특히 노심 상부에서의 Thermal Striping 문제를 야기 할 가능성이 있다. 이러한 문제에 대한 방안으로 Injection Tube 를 도입하였다.

본 연구에서는 Injection Tube 의 도입에 따른 유량 감소 효과와 그에 따른 시스템의 허용 빔 전류 상승 효과를 보임으로써, 20MW 급 LBE 표적시스템의 설계 가능성에 대해서 기술하고 있다.

2. 표적시스템

2.1 기초 표적시스템

한국 원자력 연구소에서는 1997 년부터 가속기 구동 미임계 핵변환로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 개발하고 있다[14-15]. HYPER 는 초우라늄 원소(TRU)나 Tc-99, I-129 와 같은 장수명 핵종을 핵반응을 이용하여 반감기가 짧은 핵종 또는 방사능을 띄지 않는 안정 핵종으로 바꿈으로써, 전력 생산과 방사성 폐기물의 소멸처리를 동시에 수행할 수 있는 시스템이며, 1000MW 의 열출력을 위해서 1GeV 의 양성자 빔 조사시에 19mA 이상의 빔 전류를 필요로 한다. 그림 1 은 HYPER 와 표적시스템의 개념적인 모양을 보여주고 있다.



(a) HYPER System (b) Target System

그림 1. Conception of the HYPER and Target system

기초 표적은 반구형 빔창과 원통형 빔관으로 이루어져 있다. 표적시스템은 환형으로 둘러쌓인 TRU 집합체 및 FP 집합체의 중심에 위치하며, 빔창의 젖은 표면이 노심 중앙으로부터 25cm 위에 위치한다. 냉각재인 동시에 표적 물질인 LBE 는 노심 하단부에서 유입되고, 양성자 빔은 진공을 이루고 있는 빔관을 통해 빔창을 지나 표적물질에 조사된다. 열수력 해석의 편리성을 위해서 표적시스템을 원통형 모양으로 단순화하였으며, 그림 2 는 단순화한 표적시스템을 개략적으로 보여주고 있다.

그림 2 에 보인 바와 같이 표적시스템의 최적 설계를 위해 도출되어야 할 설계 인자들은 표적 유로의 직경(D_t), 빔창에 작용하는 압력(P), LBE 유입 온도(T), 빔창의 직경(D_w), 양성자 빔의 직경(D_b), 빔 에너지(E), 빔 밀도 분포 형태, LBE 유입 속도(V), 그리고 빔창의 두께(d)등 9 가지를 고려할 수 있다. 이 중에서 표적 유로의 직경(D_t), 빔창에 작용하는 압력(P), LBE 유입 온도(T)는 전체 노심 설계의 최적화로 얻어지는 설계 변수로써, 표적시스템의 최적화에 의해

결정 될 수 없는 변수들이며, 기존의 연구를 통하여 표적 유로의 직경(D_t)은 0.66m, 빔창에 작용하는 압력(P)은 16 기압, LBE 유입 온도(T)는 노심 냉각재의 유입 온도와 같은 온도인 340°C 로 결정되었다. 또한 조사되는 양성자 빔 에너지(E)는 1GeV 로 고정하였고, 양성자 빔 밀도는 Parabolic, Uniform, offset parabolic 분포를 고려하였다.

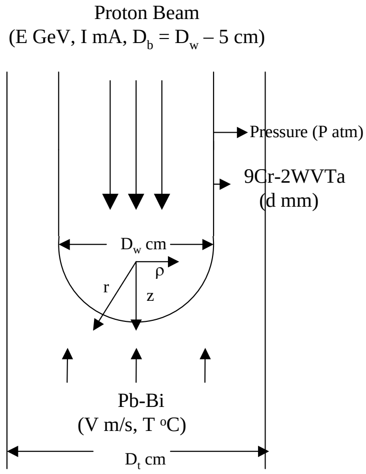


그림 2. Outline of the target system

양성자 빔은 조사되는 도중에 빔 중심이 빔관의 중심을 벗어나는 경우가 종종 발생하기 때문에, 본 연구에서는 양성자 빔의 직경(D_b)은 빔창의 직경보다 5cm 작게 결정하였다. 표적시스템의 LBE 유입 속도(V)는 빠를수록 빔창의 냉각 측면에서 효과적이지만, 빔창 물질의 부식 및 침식률도 이에 따라 증가한다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 표적시스템에서의 최고 유속은 빔관과 표적 유로 사이의 좁은 협로에서 발생할 것이므로, 표적시스템의 LBE 유속 한계치를 초과하지 않는 최대 LBE 유입 속도(V)는 빔창의 반경(D_w)에 의해 결정된다. 결국 양성자 빔의 직경(D_b)과 최대 LBE 유입 속도(V)가 빔창의 직경(D_w)을 선택함으로써 결정되어 질 수 있으며, 빔창 직경(D_w)과 빔창 두께는 각각 35cm, 2.0mm 이다.

2.2 표적시스템 설계 한계치

표적시스템을 설계할 때 만족해야 할 설계 한계치는 다음과 같다. 첫째는 LBE 의 최대 유속과 온도이다. LBE 의 속도 및 온도가 증가할수록 빔창 물질의 부식률이 증가하기 때문에 LBE 의 부식 특성에 의해 최대 온도는 500°C , 최대 유속은 2m/s 로 한정하였다[16]. 둘째는 빔창의 온도로써, 빔창 물질인 9Cr-2WVTa 은 600°C 이상에서 LBE 에 의한 부식성에 취약한 특성이 있으므로 최대 빔창 온도를 600°C 로 한정하였다. 셋째는 빔창에 작용하는 최대 허용 응력이다. 빔창 물질인 9Cr-2WVTa 의 항복응력은 600°C 에서 480MPa 이며, 이의 1/3 인 160MPa 을 빔창의 최대 허용응력으로 한정하였다[17-18].

3. 전산해석 방법

표 1 은 계산에 사용된 표적 물질 및 빔창 물질의 물성치를 보여주고 있다. LBE 는 450°C, 9Cr-2WVTa 는 500°C 에서의 물성치를 이용하였다. 9Cr-2WVTa 의 경우 자료를 얻기 힘들어 항복응력(yield stress)을 제외하고 나머지는 9Cr-MoVNb 의 물성치를 이용하였다. 9Cr-2WVTa 나 9Cr-MoVNb 가 모두 ferritic 9Cr 계통의 철금속이므로 물성치에 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

표 1. Material data used for calculations

Pb-Bi (450^{o}C)	Density (10180.8kg/m^3) Thermal Conductivity (14.2W/m·K) Thermal Expansion Coefficient (1.2×10^{-4} K^{-1}) Viscosity (1.39E-3kg/m·s)
9Cr-2WVTa (500^{o}C)	Density (7580kg/m^3) Thermal Conductivity (30W/m·K) Thermal Expansion Coefficient (1.23×10^{-5} K^{-1}) Young's Modulus (181GPa) Poisson Ratio (0.29)

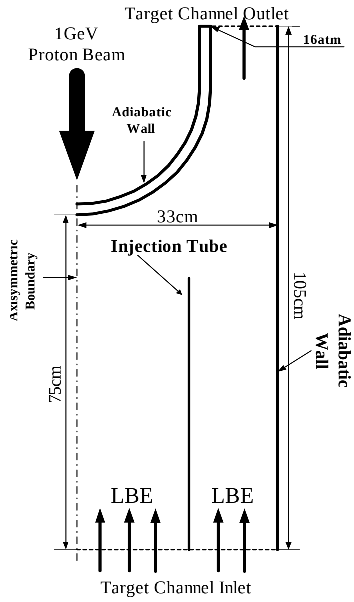


그림 3. The Computational domain and boundary conditions

빔창과 LBE 에서의 열 발생은 LCS 2.7(LAHET Code System)를 이용하였다[19]. 또한 상용전산유체 해석 코드인 CFX 4.4.를 이용하여 표적시스템의 기본적인 열수력 계산을 수행하였다. LAHET 코드에 의해서 계산된 열 발생량 결과를 fitting 하여, CFX 에서의 열 수력 계산을 위한 열생성원으로 이용하였으며, CFX 에서는 표적시스템에서의 유동 분포와 온도분포 및 압력분포를 계산하게 된다. 압력방정식은 중앙차분법을, 그 외의 방정식에 higher upwind 차분법을 이용하였고 압력보정은 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 난류모델은 logarithmic 벽함수를 갖는 표준 k-ε 난류모델을 이용하였으며 모든 계산 경우에 있어서 30< y+ <200 이 유지 될 수 있도록

조밀한 격자를 구성하였다. 사용된 turbulent Prandtl 수와 모델 파라미터는 CFX4.4 가 제공하는 기본값을 이용하였다. Inlet, outlet, symmetry 경계조건이 주어진 영역에 사용되었고 빔창, 빔관은 conducting solid 로 모사하였다. 모든 외부 wall 로의 열 전달은 없는 것으로 가정하였으며, inlet 에서는 균일한 속도 및 온도 분포를 가정하였다. 계산 영역이 축 대칭이므로 간단히 2 차원으로 모델링하여 계산시간을 절약하였다., 그림 3 은 계산 영역과 적용된 경계 조건들을 간략하게 보여주고 있다. LBE 최대 유입 속도(V)는 표적시스템에서 최대 유속이 2m/s 를 넘지 않도록 선택을 하였다.

4. 계산 결과

4.1 열 발생 계산

두 개의 빔 밀도 분포에 따른 빔창과 LBE 에서 발생되는 열을 LAHET 코드를 이용하여 계산하였다. 계산된 결과를 fitting 하여 빔이 조사되는 영역($\rho < D_b$)에서 LBE 깊이(z)방향에 따른 열 발생량을 표현할 수 있는 식을 얻었다. 빔 밀도 분포에 따라 식은 다음과 같다.

1. Parabolic 분포: $$Q = C\frac{2I}{\pi R_b^4}(R_b^2 - \rho^2) \quad \text{(unit: W/cm}^3\text{)}, \qquad (1)$$

2. Uniform 분포: $$Q = CI \quad \text{(unit: W/cm}^3\text{)}, \qquad (2)$$

여기서, Q = 단위부피당 열생성량 (W/cm^3), I = 빔 전류 세기(mA), R_b = 양성자 빔의 반경(cm), ρ= 빔창 중심으로 부터의 거리 (cm), C = 빔창으로 부터의 깊이에 따른 열 발생 상수이다.

표 2 는 빔창 직경 35cm, 빔창 두께 2.0mm 경우에 각각의 빔 밀도 분포에 따른 빔창의 젖은 표면부터의 LBE 깊이에 따른 열 발생 상수를 나타내고 있다. 빔이 조사되는 영역보다 큰 지역, 즉, $\rho > R_b$ 에서의 열 발생량은 무시할 만하며 계산의 편리성을 위해 열 발생이 없다고 가정하였다. 또한 빔창의 젖은 표면부터의 깊이 방향으로 $z > 60$cm 인 영역도 역시 열 발생량이 무시할 만하여 열 발생이 없다고 가정하였다. 그림 4 는 각각의 빔 밀도 분포에 따른 단위 빔 전류당 반경 방향으로의 열 발생량을 보여주고 있다.

표 2. The heat generation coefficient of each beam current density functions

Layer	Window Diameter = 35cm	
	Parabolic (C×10^4)	Uniform, C
Window	2.18	31.8
0<z<2cm	2.56	35.3
2<z<4	2.52	33.5
4<z<6	2.39	31.9
6<z<8	2.24	29.3
8<z<10	2.07	27.0
10<z<20	1.56	20.2
20<z<30	0.90	11.6
30<z<40	0.49	6.5
40<z<50	0.26	3.7
50<z<60	0.13	1.5

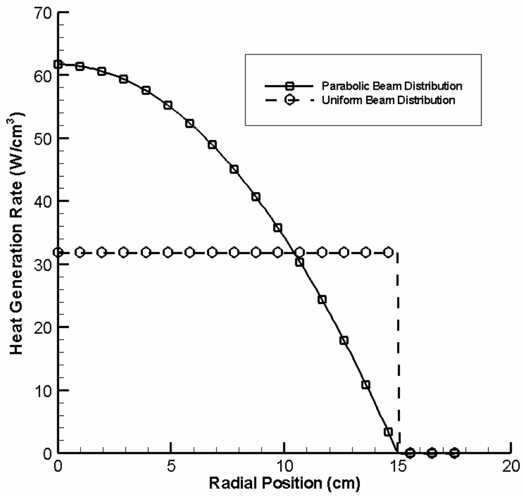


그림 4. Heat generation rate per unit proton beam current

4.2 최적 빔 밀도 분포 결정

최적의 빔 밀도 분포를 결정하기 위해서 두 개의 빔 밀도 분포에 대한 열수력 해석을 수행하였으며, 빔 밀도 분포 변화에 따른 열 수력 특성 변화를 보기 위하여 동일한 형상과 경계조건을 적용하여 계산을 수행하였다. 계산에 이용된 빔창 직경은 35 cm, 빔창 두께는 2.0 mm, LBE 유입속도 1.31 m/s, 그리고 빔 전류 20mA 이다.

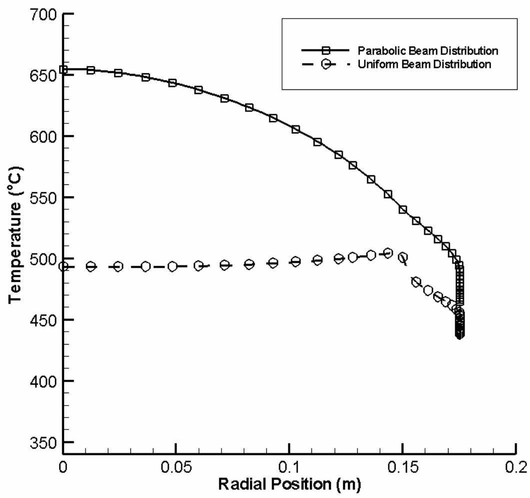


그림 5. Temperature distribution of the wetted surface at the beam window

그림 5 는 빔 밀도 분포 변화에 따른 빔창의 젖은 면에서의 온도 분포를 반경 방향 위치에 따라 보여주고 있다. LBE 의 최대 온도는 Parabolic = 654 ^{o}C , Uniform = 505 ^{o}C 이며, 빔창의

진공면에서의 최대 온도는 Parabolic = 736 °C , Uniform = 547 °C 이다. Uniform 빔 밀도 분포의 경우가 보다 낮은 peak 온도를 갖으며, LBE 의 온도 한계인 500°C 를 대체적으로 만족하고 있다. 특히 Parabolic 빔 밀도 분포의 경우, Uniform 빔 밀도 분포보다 상대적으로 높은 온도 분포를 갖으며, 빔창 중심에서 상당히 높은 온도를 갖는데, 이는 빔창 중심에서의 유동 정체에 기인하는 것으로 현재와 같은 반구형 형상에서는 Parabolic 빔 밀도 분포는 적합하지 않음을 알 수 있다.

동일한 경우에 대해서, 설계 한계치를 만족하면서 표적시스템이 허용할 수 있는 최대 빔 전류를 계산한 결과, Parabolic = 10.1mA, Uniform = 19.3mA 이다. 이 때, 최대 허용 빔 전류를 결정하는 설계 한계치는 LBE 의 최대온도 500 °C 이다. Uniform 빔 밀도 분포의 경우 Parabolic 빔 밀도 분포보다 거의 두배에 가까운 빔 전류를 허용함으로써, 열수력 관점에서 Uniform 빔 밀도 분포가 표적시스템에 적용하기에 상대적으로 적합한 빔 밀도 분포임을 알았다.

그러나, 현재의 표적시스템이 HYPER 의 정상적인 운용을 위한 빔 전류(19mA)를 수용하고 있으나, 빔창의 효과적인 냉각을 위해서는 HYPER 노심 냉각재 유량(45506.26kg/s)의 10%인 4562kg/s 를 요구하고 있으며, 또한 표적시스템 출구에서의 LBE 평균 온도(356°C)가 노심 출구에서의 LBE 평균 온도(490°C)보다 상대적으로 매우 낮은 문제를 갖고있다. 표적시스템에서의 과다한 유량은 Pumping power 의 증가를 의미하며, LBE 간의 급격한 온도 차이는 소위 thermal striping 을 야기할 수도 있다.

이에 표적시스템의 유량을 50% 줄여서, 각각의 빔 밀도 분포에 따른 최대 허용 빔 전류를 계산하였다. 계산한 결과, Parabolic = 5.4mA, Uniform = 10.1mA 로써 HYPER 를 정상 운용할 수 있는 빔 전류에는 크게 못 미치는 것을 알 수 있다.

4.3 Injection Tube 의 효과

표적시스템에서의 유량이 적어질수록, 표적시스템의 LBE 유입 속도가 떨어지게 되며, 그로 인하여 표적시스템이 허용하는 빔 전류가 작아지기 때문에 현재의 표적시스템에서는 HYPER 운용에 필요한 빔 전류를 유지하면서 유량을 감소시키는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 표적 유로의 중심에 소위 Injection Tube 라는 원통형 관을 도입하였다.

표적 유로 중심에 위치한 Injection Tube 내부(Region 1)의 LBE 유입 속도는 Injection Tube 의 바깥쪽과 표적 유로 사이의 영역(Region 2)보다 상대적으로 빠른 유속을 유지하게 된다. 또한, 기존의 표적시스템의 LBE 유입 속도보다도 빠른 속도를 유지함으로써, 유량 감소에 의해서 LBE 유입 속도가 감소되는 문제를 해결하고자 하였다.

Injection Tube 의 효과를 확인하기 위하여 두 가지 형태의 빔 밀도 분포에 대하여 열수력 해석을 수행하였다. 적용된 빔의 직경이 30cm 이기 때문에, 만일 Injection Tube 의 직경이 빔의 직경 보다 작고, Injection Tube 의 높이가 z < 60cm 인 영역보다 높아지면 Injection Tube 는 양성자 빔에 직접적으로 타격을 받게 된다. 이러한 현상을 피하기 위하여, Injection Tube 의 직경과

높이는 각각 31cm, 10cm 로 가정하였다. 그리고, Injection Tube 의 두께는 2mm 로 가정하였다. 표적시스템에 유입되는 유량은 기존의 유량의 50%이며, Injection Tube 가 없는 경우, LBE 유입 속도는 0.655m/s 이고, Injection Tube 가 도입된 경우 Region 1 과 Region 2 의 LBE 유입 속도는 각각 1.5m/s, 0.417m/s 이다. 또한, 적용된 빔 전류는 20mA 이다.

그림 6 은 빔창의 젖은 면에서의 온도분포를 Injection Tube 의 유 · 무에 따라 보여주고 있다. Injection Tube 가 없는 경우, LBE 의 최대 온도는 Parabolic = 928 ^{o}C , Uniform = 657 ^{o}C 인데 반하여, Injection Tube 가 있는 경우는 LBE 의 최대 온도가 Parabolic = 652 ^{o}C , Uniform = 515 ^{o}C 이다. 계산 결과 Injection Tube 의 도입으로 빔창 및 LBE 의 최대 온도를 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

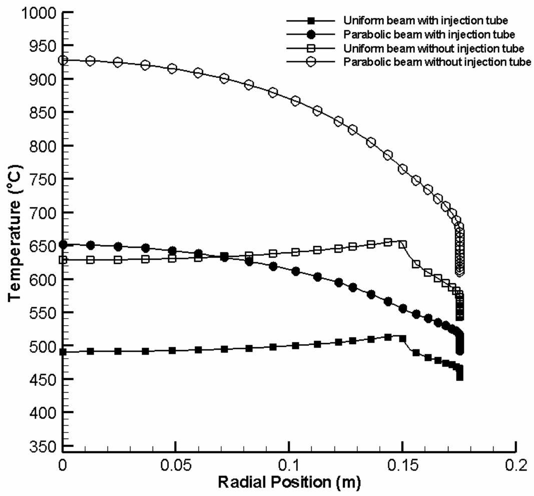
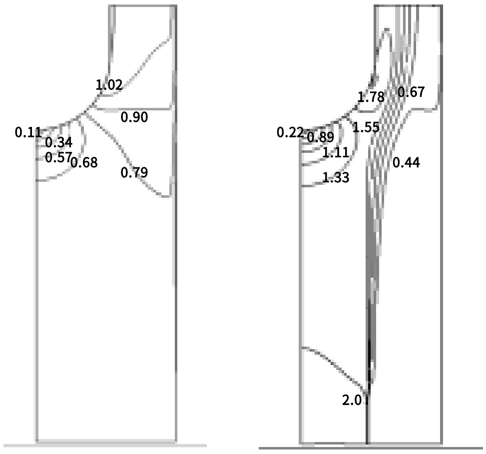


그림 6. The temperature distributions of the wetted surface of the beam window with or without the injection tube

Injection Tube 의 효과를 확인 하기 위하여, 이번에는 설계 한계치를 만족하는 허용 빔 전류를 계산하였다. 이 때 LBE 유입 속도는 Region 1 과 Region 2 에서 각각 1.635m/s, 0.378m/s 이다. LBE 유입 속도는 표적시스템 내부의 유속이 2m/s 를 초과하지 않도록 결정되었다. 그림 7 은 Injection Tube 의 유 · 무에 따른 표적시스템에서의 유속 분포를 보여주고 있다. Injection Tube 에 의해서 빔창 중심 아래 부분에 형성되었던 유동 정체 영역이 상당히 줄어든 모습을 볼 수 있으며, 이로 인한 빔창 냉각 효과의 증가가 기대된다. Injection Tube 를 도입한 경우, 표적시스템의 허용 빔 전류는 Parabolic = 10.3mA, Uniform = 19.6mA 로 계산되었다. 이는 표적시스템의 유량을 50% 감소시키기 이전의 표적시스템이 허용 가능한 최대 빔 전류보다 증가된 결과로써, 같은 유량의 표적시스템 보다는 거의 두배에 가까운 빔 전류를 허용하고 있음을 알 수 있다. 계산 결과 Injection Tube 의 도입은 HYPER 를 운용하기 위한 필요한 빔 전류를 유지하면서, 표적시스템의 유량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 훌륭한 대안이 될 수 있음을 확인하였다.



(a) w/o injection tube (b) w/ injection tube

그림 7. The velocity distributions of the target system with or without injection tube

Injection tube 의 높이 변화에 따른 영향을 조사하기 위해서, Injection tube 의 직경을 고정하고 Injection Tube 의 높이를 10cm 에서 65cm 까지 증가시키면서 uniform 빔을 적용하여 열수력 해석을 수행하였다. Injection Tube 의 직경은 31cm 이며, Region 1, Region 2 에서의 LBE 유입 속도는 각각 1.5m/s, 0.417m/s 이고, 빔 전류는 20mA 이다.

그림 8 은 Injection Tube 의 높이 변화에 따른 빔창과 LBE 의 최대 온도와 표적시스템에서의 최대 유속을 보여주고 있다. 계산 결과, Injection Tube 의 높이가 높아질수록 빔창에서의 냉각효과가 증가함을 알 수 있으며, 허용 빔 전류의 증가가 기대된다. 그러나 Injection Tube 의 높이가 65cm 인 경우, 표적시스템에서의 최대 속도가 2m/s 를 초과함으로써 LBE 유입 유속을 감소시켜줘야 할 필요가 있으며, 이는 허용 빔 전류의 감소를 예상케한다.

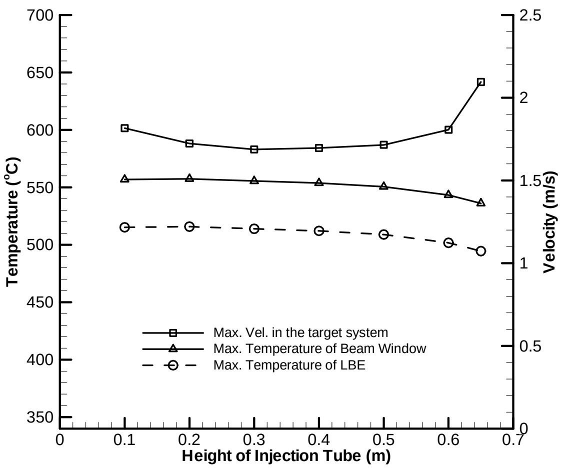
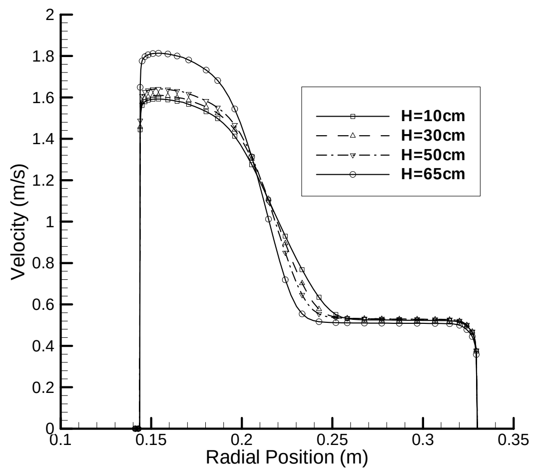
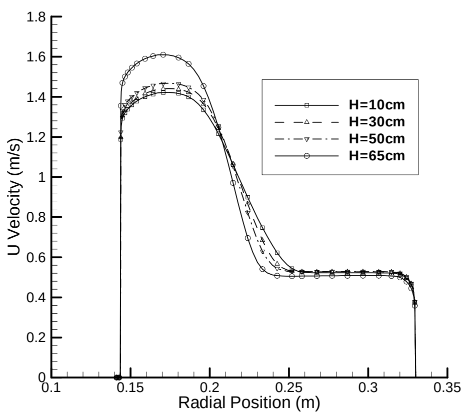


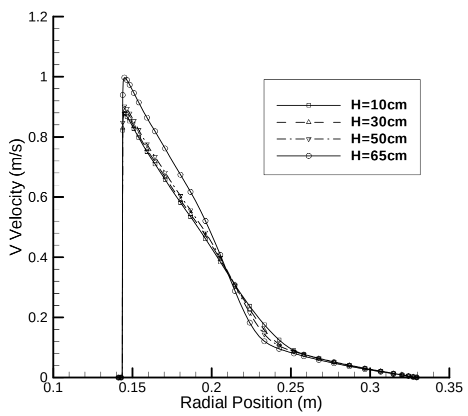
그림 8. The peak temperatures and maximum velocities of the target system with injection tube height variation

그림 9 는 빔창의 젖은 면으로부터 위로 10cm 되는 곳에서의 LBE 속도 분포를 나타내고 있다. Injection Tube 의 높이가 증가할수록 빔창 근처에서 각 방향의 속도 성분들이 증가함을 할 수 있으며, 특히 Injection Tube 의 높이가 65cm 인 경우에 각 속도 성분들이 급격하게 증가함을 알 수 있다.



(a) Total Velocity





(b) U velocity (c) V velocity

그림 9. Velocity profiles above 10cm from bottom of the beam window

그림 10 는 Injection Tube 의 높이 변화에 따른 표적시스템의 허용 빔 전류를 계산하여 도시한 것이다. 각 경우의 LBE 유입 속도는 표적시스템의 유속이 2m/s 를 넘지않는 범위에서 결정되었으며, 모든 경우에 있어서 유량은 HYPER 시스템의 냉각재 유량의 5%로 고정하였다.

가장 높은 허용 빔 전류를 제공하는 Injection Tube 의 높이는 0.5m 이며, Region 1 과 Region

2 의 LBE 유입 속도가 각각 1.8m/s, 0.331m/s 일 때 Uniform 빔의 경우에는 최대 허용 빔 전류는 22.1mA, 빔창의 최대 온도는 545 °C, Parabolic 빔의 경우에는 최대 허용 빔 전류는 12.3mA, 빔창의 최대 온도는 549 °C 이다.

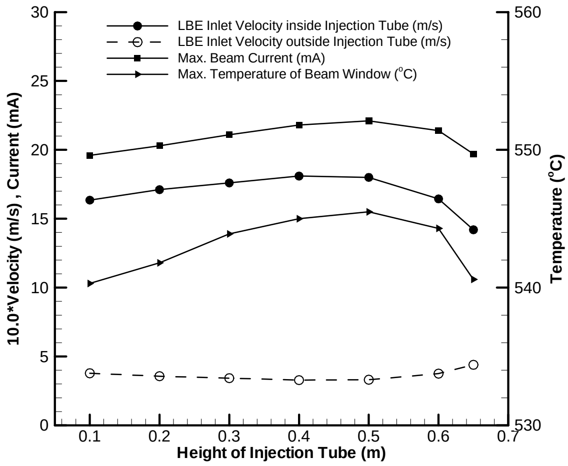


그림 10. The peak temperatures and maximum LBE inlet velocities of the target system with injection tube height variation

표적시스템의 유량을 기존의 표적시스템의 50%로 줄였을 경우, Injection Tube 의 도입으로 Uniform 빔의 경우 약 110%의 허용 빔 전류 상승을 얻었으며, Parabolic 빔의 경우 약 125%의 빔 전류 상승을 이끌어냈다. 계산 결과 Injection Tube 의 도입은 Parabolic 빔 적용 시 더욱 효과적임을 알 수 있지만, 여전히 Parabolic 빔은 HYPER 가 요구하는 빔 전류를 수용 할 수 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

기존의 연구를 통해 얻어진 표적시스템은 HYPER 가 요구하는 빔 전류(19mA)를 제공하고 있지만, 빔창의 효과적인 냉각을 위해서 HYPER 시스템 유량의 10%를 요구하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 표적시스템의 유량을 감소시키는 방안으로 원통형 Injection Tube 를 채널 유로의 중심에 위치시키는 것을 제시하였다.

직경 31cm, 높이 50cm 인 Injection Tube 의 설치로 약 50%의 유량 감소와 함께, Uniform 빔의 경우 약 110%의 허용 빔 전류 상승을 얻었으며, Parabolic 빔의 경우 약 125%의 빔 전류 상승을 이끌어냈다.

연구 결과, Injection Tube 의 도입은 HYPER 를 운용하기 위한 필요한 빔 전류를 유지하면서, 표적시스템의 유량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 훌륭한 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

앞으로의 연구는 Injection Tube 의 직경 변화에 따른 열수력 특성 변화 고찰이 따라야 할 것이며, 효과적인 빔창 냉각을 위해서 2 중 원통형 Injection Tube 를 이용한 유동 제어를 고려하고 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Buono, S. et al., 1998, Numerical Studies Related to the Design of the Beam Target of the Energy Amplifier Prototype, *Heavy Liquid Metal Conference ’98*, Vol. 1, p.249.
2. Cheng, X. and Slessarev, I., Thermal-hydraulic Investigations on Liquid Metal Target System, *Nuclear Engineering and Design*, **202**, 297 (2000).
3. Gohar, Y. et al., 2001, Lead-Bismuth-Eutectic Spallation Neutron Source for Nuclear Transmuter, *AccApp/ADTTA ’01*, Reno, Nevada, Nov. 11-15.
4. Tak, N. I. and Cheng, X., Thermal Hydraulic Design of the Active Part of the MEGAPIE Target, *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Cheju, Korea (May 2001).
5. Gromov B. et al., 1998, Experience on Development of Molten Lead-Bismuth Target for Accelerator-Driven Systems, *HLMC ’98*, Vol. 1., pp. 49-59.
6. Kim Y. H. et al., 2003, Optimisation of Height-to-Diameter Ratio for an Accelerator-Driven System, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 143, pp. 141-157.
7. Song, T. Y. and Tak, N. I., 2001, Optimal Design of HYPER Target System Based on the Thermal and Structural Analysis of Pb-Bi Spallation Target and Beam Window, *Annals of Nuclear Energy*.
8. Tak, N. I. et al., 2001, Numerical Studies on Thermal Hydraulics of HYPER target, *AccApp/ADTTA ’01*, Reno, Nevada, Nov. 11-15.
9. Cho, C. H. et al., 2002, Optimum Design of Beam Window’s Diameter and Thickness of HYPER Target System, *Proc. KNS Autumn Meeting*, Oct. 24-25.
10. Cheng, X. et al., Thermal hydarulic Design of an ADS with Three Spallation Targets, *Proc. ADTTA ’99 Conference*, Prague (June 1999).
11. Tichelen, K. V. et al., 1999, MYRRHA Project, a Windowless ADS Design, *Proc. ADTTA ’99*, Prague, Czech Republic.
12. ANSALDO, 2001, XADS Pb-Bi Cooled Experimental Accelerator Driven System Reference Configuration, Summary Report.
13. Cho, C. H. et al., Design of Lead-Bismuth Spallation Target with Hemi-Spherical Beam Window Based on Thermal-Hydraulic Analyses, *Proc. KNS Spring Meeting*, May. 29-30
14. WON S. PARK et al., “Transmutation Technology Development,” Korea Atomic Research Institute, KAERI/RR-2117/2000 (2000).

15. Park, W. S. et al., 1997, Development of Nuclear Transmutation Technology, KAERI/RR-1702/96.
16. Yachmenyov, G. S. et al., 1999, Problems of Structural Materials' Corrosion in Lead-Bismuth Collant, P roceedings of Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol1. p133-140.
17. Klueh, R. L., 1996, Experience with Ferritic/martensitic Steels for Fusion Application, Proceedings of International Workshop on Spallation Materials, 3.3-3.26.
18. Rust, J. H., 1979, Nuclear Power Plant Engineering, Haralson Publishing Company, p385.
19. Prael, R. E. et al., 1989, User Guide to LCS : The LAHET Code System, LA-UR-89-3014.