2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

HYPER 표적시스템의 빔창 직경 및 두께의 최적설계

Optimum Design of Beam Window's Diameter and Thickness of Hyper Target System

조충호, 탁남일, 송태영, 박원석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

HYPER 는 장수명 방사선 핵종인 TRU 와 핵분열 생성물 Tc-99, I-129 의 핵변환을 위해 고안되었다. 냉각재와 핵파쇄 표적 물질로는 Pb-Bi 를 이용하였다. HYPER 가 1000MW 의 출력을 유지하기 위해서는 약 20mA 이상의 양성자 빔이 필요할 것으로 예상된다. HYPER 의 기초적인 빔창 형상으로 원통형 빔관과 반구형 빔창을 채택하였다. 빔창의 직경과 두께를 변경시키며, 설계 한계치인 Pb-Bi 의 온도 < 500^{o}C, 빔창의 온도 < 600^{o}C, Pb-Bi 의 속도 < 2m/s, 그리고 빔창에 작용하는 스트레스 < 160MPa 를 만족하는 최대 허용 전류를 구하였다. 열 발생을 구현하기 위해서 LAHET 코드를 이용하였다. 또한 열수력 해석을 위해서 CFX 를 이용하였다. 설계 한계치를 근거로 얻어진 최대 허용 전류는 9.2mA 로써, 요구되는 전류에 비해 적다. 그러므로 향상된 표적시스템의 설계가 요구된다.

Abstract

HYPER is designed to transmute long-lived TRU and fission products such as Tc-99 and I-129. Pb-Bi is used as the coolant and spallation target material at the same time. HYPER is expected to need about 20mA proton beam to sustain a 1000MW_{th} power level. The cylindrical beam tube and spherical window is adopted as the basic window shape of HYPER. The window diameter and the window thickness are varied to find the maximum allowable current based on the design criteria : Pb-Bi temperature < 500^{o}C, window temperature < 600^{o}C, Pb-Bi velocity < 2m/s and window stress < 160MPa. The LAHET code is used to simulate heat generation. CFX is also used for the thermal-hydraulics calculation. Based on our design criteria, the maximum allowable current is calculated to be about 9.2mA, which is smaller than the required current. Therefore, an upgrade of the target system design is required.

1. 서 언

원자력을 이용한 에너지 변환시스템은 열효율이 높고 오염원 발생률이 낮기 때문에 국내에서도 다수의 원자로를 건설 및 가동하여 전력 생산의 우위를 차지하고 있으며, 특히 부존자원이 빈약한 우리나라의 실정으로 비추어 볼 때 원자력은 우리가 현 시점에서 의존 할 수 있는 유일한 에너지원이다. 그렇지만 원자력 산업이 직면하고 있는 가장 큰 문제중의 하나가 TRU 와 같은 장수명핵종과 사용 후 핵연료의 처리 및 처분 문제이다.

장수명핵종의 처리 방법으로 현재 제안되고 있는 가장 손쉬운 방법은 지하 심층 저장이다. 그러나 장수명핵종의 독성이 길게는 수백만년이라는 점을 감안한다면, 지하 심층 저장 방법은 자칫 인류의 건강과 환경에 장기적이고도 치명적인 영향을 줄 수 있으며, 또한 지질학적으로 검증된 부지확보 및 막대한 관비 비용, 그리고 NIMBY 현상등으로 그 저장소를 선정함에 있어 많은 어려움이 수반된다.

사용 후 핵 연료의 처리 문제에 관하여 다양한 연구들이 세계적으로 진행되어 왔으며, 최근 주목되고 있는 연구 분야로서 가속기 구동 미임계 핵변환로(*A*ccelerator-*D*riven Transmutation *S*ystem, ADS)를 들 수 있다. ADS 는 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 필요하다. 특히 핵파쇄 표적 시스템은 ADS 의 핵심 요소로써 내구성과 안정성이 보장되어야 한다.

한국 원자력 연구소(KAERI)에서도 1997 년부터 가속기 구동 미임계 핵변환로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 개발하고 있다[1-2]. 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 20mA 이상의 빔 전류를 필요로 한다. Figure 1 은 HYPER 의 개략적인 모양을 보여주고 있다.

HYPER 는 시스템 여건상 핵파쇄 표적과 노심 냉각재 물질을 같은 종류로 사용하는 것이 바람직하며 Pb-Bi 를 대상 물질로 채택하였다. Pb-Bi 는 냉각이 간편하고 효율적이며, 중성자 흡수 단면적이 작으며, 양성자 빔 조사에 의한 표적 자체의 손상이 없고, 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.

표적 물질로 액체 금속인 Pb-Bi 을 사용할 경우 가속기의 진공과 Pb-Bi 를 분리시켜 주는 빔창이 있는 구조와 빔창이 없는 구조를 고려할 수 있는데, 표적 냉각의 편리성 및 안정성 측면에서 빔창이 있는 구조를 선택하였다. 빔창 물질은 수명과 관련된 부식, 방사선 손상 특성을 고려해서 접촉하는 액체금속인 Pb-Bi 와의 화학적 특성이 좋고, 방사능에 의한 기계적 특성이 좋은 ferritic/martensite 계통의 철금속인 9Cr-2WVTa 를 선정하였다.

본 연구에서는 주어진 설계 한계치 범위안에서 최대 전류를 수용할 수 있는 표적시스템의 최적설계를 목적으로 하고 있다. 양성자 빔 조사에 의한 열 발생량은 LAHET 코드를 이용하였으며, CFX 를 이용하여 열수력 해석을 수행하였고, 1 차적으로 포물선형 빔에 대한 최적 빔창

반경, 최적빔창 두께 및 허용가능 최대 전류를 도출하였다.

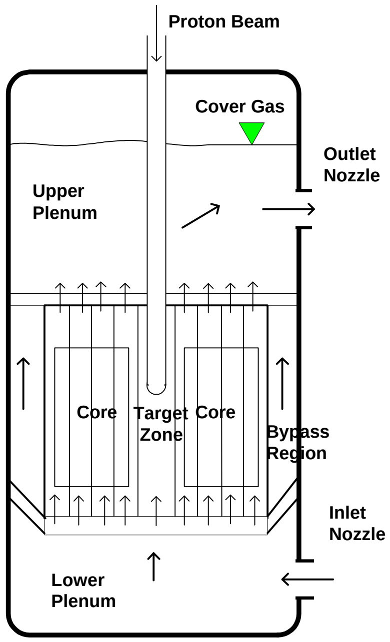


Figure 1. The outline of HYPER

2. 표적시스템

2.1 기초 표적시스템

현재 HYPER 에서 고려하고 있는 표적시스템의 위치는 노심의 중앙에 위치하며, 표적시스템 영역을 중심으로 TRU 집합체 및 FP 집합체가 환형으로 둘러 쌓이게 된다. 빔창의 하단부가 노심 중앙에서 25cm 위에 위치하며, 열수력 계산을 위해 표적시스템을 단순화하면 Figure 2 와 같이 원형관 유로 형태로 표현 할 수 있다.

냉각재인 동시에 표적 물질인 Pb-Bi 가 노심 하단부에서 유입되며, 양성자 빔은 진공을 이루고 있는 빔관을 통해 반구형 빔창을 지나 표적물질에 조사된다.

최적의 표적시스템을 설계함에 있어 고려해야 할 설계 인자들은 표적시스템의 설계 한계치를 만족해야 할 뿐만 아니라 원자로와의 상호 관계도 고려해서 결정되어야 하며, 본 연구에서는 HYPER 가 최대 허용 전류를 받아들일 수 있는 설계 인자를 결정하는데 그 범위를 국한하였다.

표적시스템의 최적 설계를 위해 도출되어야 할 설계 인자들은 표적 유로의 직경(D_t), 빔창에 작용하는 압력(P), Pb-Bi 유입 온도(T), 빔창의 직경(D_w), 양성자 빔의 직경(D_b), 빔 에너지(E), 빔 밀도 분포 형태, Pb-Bi 유입 속도(V), 그리고 빔창의 두께(d)등 9 가지로 대변할 수 있으며 최대 허용 빔 전류(I)를 줄 수 있는 최적 설계 인자들을 결정해야 한다.

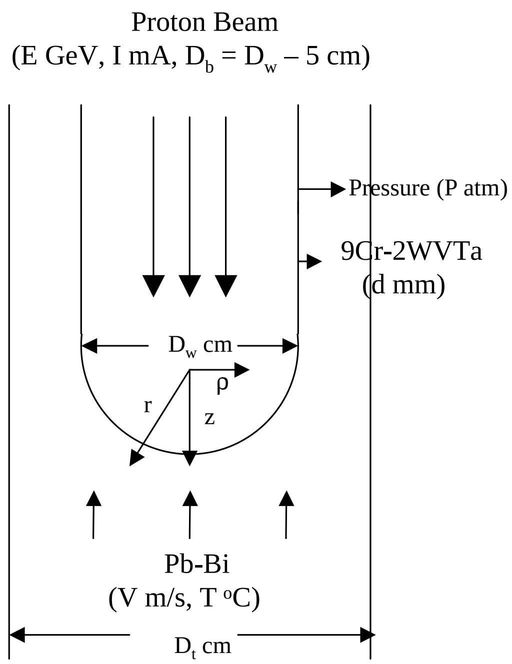


Figure 2. Outline of the target system design

그러나 9 개의 설계 인자들 중에서 표적 유로의 직경(D_t), 빔창에 작용하는 압력(P), Pb-Bi 유입 온도(T)는 전체 노심 설계의 최적화로 얻어지는 설계 변수로써, 표적시스템의 최적화에 의해 결정 될 수 없는 사항이다. 그러므로 3 가지 설계 인자에 대해서는 제 1 단계 노심 설계 연구 결과로 얻어진 값을 사용하였다.

노심 최적 설계에 의해 얻어진 표적 유로의 직경(D_t)는 0.66m 로 결정되었다. 빔창에 작용하는 압력(P)은 Pb-Bi 와 cover gas 에 의해서 작용하는 압력의 합으로 정해질 수 있으며, Pb-Bi 의 경우 정압은 1atm/m 로 길이 8m 인 빔관에 8 기압이 작용하게 되고, cover gas 에 의해서 작용하는 압력이 8 기압으로써, 빔창 하단부에서 상향으로 30cm 인 곳에 총 16 기압의 압력이 작용한다. Pb-Bi 유입 온도(T)는 노심 냉각재의 유입 온도와 같은 온도로 결정하였으며 340°C 이다.

또한 조사되는 빔 에너지(E)는 1GeV 로 고정하였고, 빔 밀도 분포 형태는 포물선형 빔 (parabolic beam), 균일빔(uniform beam), 스캔빔(scanned beam)을 고려하고 있으며, 본 연구에서는 우선적으로 포물선형 빔에 대한 문제로 국한시켰다.

여전히 결정되지 않은 설계 인자들은 빔창의 직경(D_w), 양성자 빔의 직경(D_b), Pb-Bi 유입 속도(V), 그리고 빔창의 두께(d)이다.

양성자 빔의 직경(D_b)은 클수록 빔 전류 밀도가 낮아지고, 빔이 조사되는 빔창이나 표적에서의 열 발생이 적어지기 때문에, 그로 인한 시스템 허용 전류의 증가를 기대할 수 있다. 그러나 양성자 빔이 통과하게 될 빔창의 직경(D_w)보다 작아야 하기 때문에 한정적인 범위내에서 결정이 가능하다. 빔창의 직경(D_w)도 이러한 관점에서 클수록 좋지만, 역시 표적 유로의 직경

(D_t) 제한과 빔창에서의 허용응력 제한 때문에 무작정 크게 할 수 없는 요인이 있다.

본 연구에서는 양성자 빔의 직경(D_b)이 빔창의 직경보다 5cm 작은 경우를 택하였다. 이는 양성자 빔이 조사되는 도중에 이동되어 빔관의 중심을 통과하지 않더라도 5cm 정도의 여유면 빔이 빔관을 벗어나지 않을 것이라는 판단에서 결정하였다.

빔창의 두께는 결정된 빔창 반경에 대해서 빔관 중심쪽으로 증가되도록 하였다. Pb-Bi 유입 속도(V)는 빠를수록 빔창의 냉각에 효과적이지만, Pb-Bi 의 부식 특성상 표적시스템에서의 유속이 2m/s 를 초과해서는 안된다는 제한이 있다. 또한 Figure 2 에서 보는 바와 같이 표적시스템에서의 최고 유속이 빔관과 표적 유로 사이의 좁은 협로에서 발생할 것이므로 최대 Pb-Bi 유입 속도(V)는 빔창의 반경(D_w)에 의해 결정된다 할 수 있다. 결국 결정되지 않은 설계 인자들 중 양성자 빔의 직경(D_b)과 최대 Pb-Bi 유입 속도(V)가 빔창의 직경(D_w)을 선택함으로써 결정될 수 있음을 알았다.

2.2 표적시스템 설계 한계치

표적시스템을 설계할 때 만족해야 할 설계 한계치는 다음과 같다. 첫째는 Pb-Bi 의 최대 유속과 온도이다. Pb-Bi 의 속도 및 온도가 증가할수록 빔창 물질의 부식률이 증가하기 때문에 Pb-Bi 의 부식 특성에 의해 최대 온도는 500°C , 최대 유속은 2m/s 로 한정하였다[3]. 둘째는 빔창의 온도로써, 빔창 물질인 9Cr-2WVTa 은 600°C 이상에서 Pb-Bi 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[4-5]. Table 1 은 설계 한계치와 결정된 설계 인자들을 보여주고 있다.

3. 전산해석 방법

2.1 에서 언급된 바와 같이 본 연구에서 결정되어야 할 설계 인자들은 빔창의 직경(D_w), 양성자 빔의 직경(D_b), Pb-Bi 유입 속도(V), 그리고 빔창의 두께(d)로 축약되었으며, HYPER 가 요구하는 최대의 빔 전류를 줄 수 있는 설계 인자들의 조합을 찾아내야 하는 것이 관건이다.

빔창과 Pb-Bi 에서의 열 발생은 LCS 2.7(LAHET Code System)를 이용하였다[6]. 또한 CFX 4.4. 을 이용하여 표적시스템의 기본적인 열수력 계산을 수행하였다. LAHET 코드에 의해서 계산된 열 발생량 결과를 fitting 하여, CFX 에서의 열 수력 계산을 위한 열생성원으로 이용하였다. CFX 에서는 표적시스템에서의 유동 분포와 온도분포 및 압력분포를 계산하게 된다.

Table 2 는 계산에 사용된 표적 물질 및 빔창 물질의 물성치를 보여주고 있다. Pb-Bi 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.

Table 1. The design criteria and values of fixed parameters.

Material and Shape of Target System	Material of Beam Tube and Window	9Cr-2WVTa
	Shape of Beam Tube and Window	Cylindrical beam tube + Hemi-Spherical beam window
	Target Material	Pb-Bi
	Target Channel Shape	Cylinder
Design Parameters	Target Channel Diameter(D_t)	66cm
	Pb-Bi Inlet Temperature(T)	340°C
	Pressure loaded to beam window(P)	16atm at 0.3m above lower surface of the beam window
	Window Diameter(D_w)	Need to be decided
	Beam Diameter(D_b)	(D_w – 5)cm
	Distribution of Beam Current Density	Parabolic with circular beam shape
	Inlet Velocity of Pb-Bi(V)	Need to be decided
	Beam Energy(E)	1GeV
	Thickness of Beam Window(d)	Need to be decided
Design Criteria	Temperature of Pb-Bi	< 500°C
	Velocity of Pb-Bi	< 2m/s
	Temperature of Beam Window	< 600°C
	Stress Intensity of Beam Window	< 160MPa

기 언급된 설계 인자들을 도출함에 있어서, 빔창의 직경은 50cm 에서 35cm 까지 5cm 간격으로 감소시키면서 계산을 수행하였다. 빔창의 두께는 2.0mm 에서 3.5mm 까지 0.5mm 씩 증가시키면서 계산을 수행하였다. 양성자 빔의 반경은 각 빔창 직경에서 5cm 작도록 했으며, 빔의 전류는 0.1m 씩 증가시키면 계산을 수행하였고, Pb-Bi 최대 유입 속도는 표적시스템에서 최대 유속이 2m/s 를 넘지않도록 선택을 하였다.

Table 2. Material data used for calculations

Pb-Bi (450°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°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)

4. 계산 결과

4.1 열 발생 계산

양성자 빔 조사에 의해 빔창과 Pb-Bi 에서 발생되는 열을 계산하기 위하여, 빔창과 빔창 아래의 Pb-Bi 영역을 r 방향으로는 12 개, ρ 방향으로는 8 개, 총 96 개의 셀로 분할하였다. Table 3 은 빔창 직경이 40cm, 빔의 직경 35cm, 빔창 두께 2mm 인 경우 각 셀들에서 발생되는 열량을 보여주고 있다. 여기서 빔창은 19.8 < r < 20cm 에 위치한다. 열발생량 계산은 총 10 회에 걸쳐 계산하였으며, ρ > 20cm 인 영역에서의 열발생량은 0.4W/cm^3 을 초과하지 않았다. 계산 결과 조사되는 빔 에너지의 62%가 빔창과 Pb-Bi 내부에서 열로 변환됨을 알 수 있으며, 빔창에서는 약 5%만이 열로 변환됨을 알 수 있다. 빔창 중심에서의 열발생량은 1mA 당 45W/cm3 이며, 2mm 의 빔창 두께에 대해서는 9W/cm^2 의 열이 발생된다. 또한 조사되는 빔의 반경보다 큰 영역(ρ > 17.5cm)에서는 열 발생이 미약함을 알 수 있으며, 본 연구에서는 열 발생이 없는 영역으로 간주하였다. Pb-Bi 표적 영역의 계산 결과를 보면 깊이 방향으로 r > 80mm 인 곳에서의 열발생이 미약함을 알 수 있는데, 본 연구의 주된 관심은 빔창과 빔창 근처에서의 열발생이므로 문제의 단순화를 위해서 역시 열 발생이 없는 영역으로 간주하였다.

계산된 결과를 fitting 하여 빔이 조사되는 영역(ρ < 17.5cm)에서 깊이(z) 방향으로서의 빔 전류 세기의 변화에 의한 열 발생량을 표현할 수 있는 식 (1)을 얻었다.

$$Q = C\frac{2I}{pR_b^4}(R_b^2 - r^2) \quad (\text{ unit : W/cm}^3\text{ }) \qquad (1)$$

여기서, Q = 단위부피당 열생성량 (W/cm^3),

I = 빔 전류 세기(mA),

R_b = 양성자 빔의 반경(cm),

r = 빔창 중심으로 부터의 거리 (cm),

Table 3. The heat generation rate(W/cm^3) of cells for window diameter of 40cm case (beam radius : 35cm, current : 1mA).

	Window and Pb-Bi under window							
	0<ρ<2.5cm	2.5<ρ<5	5<ρ<7.5	7.5<ρ<10	10<ρ<12.5	12.5<ρ<15	15<ρ<17.5	17.5<ρ<20
Window	45.0	42.9	40.1	34.6	26.7	17.3	5.9	0.3
20<r<22cm	52.2	49.1	45.3	38.5	29.7	19.1	6.4	0.1
22<r<24	50.6	49.1	44.8	37.8	29.1	18.2	6.2	0.2
24<r<26	48.3	46.2	42.3	35.5	27.2	17.2	5.9	0.3
26<r<28	46.1	43.1	39.4	33.0	25.3	15.6	5.5	0.5
28<r<30	41.9	40.1	36.3	30.6	22.9	14.4	5.2	0.6
30<r<40	32.3	30.5	27.5	23.0	17.3	10.7	4.2	0.8
40<r<50	19.1	18.1	16.2	13.4	10.0	6.2	2.7	0.9
50<r<60	10.5	10.1	9.0	7.4	5.5	3.5	1.7	0.7
60<r<70	6.1	5.8	5.2	4.3	3.3	2.1	1.2	0.6
70<r<80	3.0	2.8	2.4	1.9	1.4	0.9	0.5	0.3
80<r, z<80	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Figure 3 은 Table3 과 같은 조건에서 빔창과 빔창 바로 아래 부분의 열발생을 LAHET 에 의해서 계산한 결과와 식 (1)에 의해서 계산된 결과를 보여주고 있다. 계산에 사용된 상수 C 는 빔창과 빔창 바로 아래에서 각각 2.20×10^4, 2.56×10^4 로 계산되었다. 반경 (-)는 fitting 을 위한 대칭 설정을 위하여 도입되었다. 각각의 경우 0.8%, 0.6%의 fitting 오차를 보임으로써 두개의 결과가 서로 좋은 일치를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Table 4 는 각각의 빔창 직경에 대해서 fitting 한 결과를 보여주고 있으며, 식 (1)과 Table 4 의 결과를 CFX 에서의 열 수력 계산을 위한 열 발생원 함수로 이용하였다.

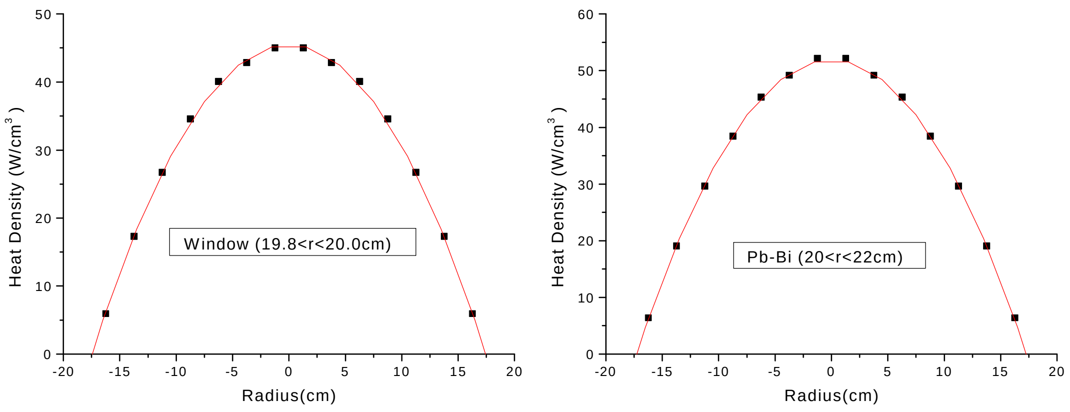


Figure 3. Fitting result of beam window and Pb-Bi region (window diameter=40cm)

Table 4. The fitting results of constant C

Layer	C(x10^{4})				
	D_w=50cm	45cm	40cm	35cm	30cm
Window	2.22	2.20	2.20	2.18	2.17
20<r<22cm	2.55	2.55	2.56	2.56	2.54
22<r<24	2.54	2.53	2.53	2.52	2.52
24<r<26	2.42	2.42	2.40	2.39	2.36
26<r<28	2.30	2.28	2.27	2.24	2.22
28<r<30	2.13	2.11	2.09	2.07	2.04
30<r<40	1.63	1.61	1.59	1.56	1.52
40<r<50	0.98	0.96	0.93	0.90	0.87
50<r<60	0.54	0.53	0.51	0.49	0.46
60<r<70	0.31	0.29	0.28	0.26	0.24
70<r<80	0.16	0.15	0.14	0.13	0.11

4.2 열 수력 및 응력 계산

4.2.1 난류모델

열 수력 계산을 위해 사용한 코드는 CFX 4.4 이며, 얻어진 열발생량은 사용자 정의 함수(User Defined Function)를 이용하여 문제에 적용하였다. 압력방정식은 중앙 차분법을, 그 외의 방정식에 hybrid 차분법을 이용하였고 압력보정은 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 난류모델은 logarithmic 벽함수를 갖는 표준 k-ε 난류모델을 이용하였다. 사용된 turbulent Prandtl 수와 모델 파라미터는 CFX4.4 가 제공하는 기본값을 이용하였으며, 각 방정식에 사용된 solver 는 모두 line solver 를 이용하였다.

4.2.2 경계조건 및 가정

Inlet, outlet, symmetry 경계조건이 주어진 영역에 사용되었고 빔창, 빔관은 conducting solid 로 모사하였다. 모든 외부 wall 로의 열전달은 없는 것으로 가정하였으며, inlet 에서는 균일한 속도 및 온도 분포를 가정하였다. 계산 영역이 축대칭이므로 간단히 2 차원으로 모델링하여 계산시간을 절약하였다.

4.2.3 응력 계산

일반적으로 원통형이나 반구형에서의 내·외부 압력 차이(Δp)에 의한 기계적인 응력은 공식으로 잘 알려져 있으며, 특히 원통형 빔관에서 지배적인 값을 갖게되는 hoop 응력은 다음과 같은 식 (2)로 구 할 수 있다.

$$s_q = \frac{\Delta p \times (0.5 \times D_w - d)}{d} \qquad (2)$$

표적시스템의 경우 표적과 빔창에 고에너지의 양성자 빔 조사됨에 따라, 높은 열이 발생하게 된다. 특히 유입되는 Pb-Bi 에 의해 냉각이 이루어짐으로써 빔창의 내·외부에 온도차이(Δp)가 발생되며, 이에 따른 열응력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 빔창에서의 열응력을 계산하기 위하여 이미 알려져 있는 평판에서의 온도차이에 의한 열응력 계산식을 적용하였다. 빔에서의 열응력은 온도차의 함수로써 식 (3)으로 나타난다.

$$s_{th} = Ea\Delta T \qquad (3)$$

여기서, α =선팽창계수이며, E = Young’s modulus 이다.

반구형 빔창에 발생하는 기계적인 응력은 원통형 빔관에서 발생하는 hoop 응력의 1/2 이 발생하며, 빔창 및 빔관에 발생하는 최대 응력은 기계적인 응력과 열응력의 합으로 나타낼 수 있다.

우선 식 (2),(3)을 본 연구에 적용함에 있어 그 효용성을 확인하고자, 빔창 안쪽 직경 40cm, 빔창 두께 2mm, 빔 전류 8mA 인 경우에 대해서 ANSYS 를 이용한 결과와 식 (2),(3)에 의해 얻어진 결과를 비교해 보았다. CFX 계산 결과, 최대 온도차는 빔창의 중심에서 24°C 이며, ANSYS 계산 결과 최대 열응력은 47MPa 이고, 기계적인 응력은 빔관에서 165MPa 로 나타났다. 또한 표적시스템에서 발생하는 최대 응력은 빔관에서 발생하는 기계적인 응력과 같은 165MPa 로 계산되었다. 반면 같은 경우에 대해서 식(2),(3)을 이용하여 계산하면, 기계적인 응력은 160MPa, 열응력은 53MPa 이다. 계산 결과 식(2),(3)에 의한 결과와 ANSYS 를 이용한 계산 결과에 큰 차이가 없으며, 본 연구에서는 표적시스템에 발생하는 최대 응력이 설계 한계치를 초과하는지에 관심이 있기 때문에, 식 (2),(3)을 이용하여 최적 설계 인자를 도출하는 도구로 사용함에 무리가 없음을 알 수가 있으며, 계산 결과를 Table 5,6 에 기술하였다.

4.2.4 열 수력 계산 결과

우선 빔창의 두께 변화에 따른 표적시스템의 열수력 특성을 파악하기 위하여 빔창의 직경을 40cm 로 고정시키고, 빔창의 두께를 2mm 에서 3.5mm 까지 0.5mm 씩 증가시키면서 계산을 수행하였으며, Table 5 는 그 결과를 보여주고 있다.

Table 5 를 통해서 빔창의 두께가 얇아질수록 허용 빔 전류가 커지는 것을 알 수 있으며, 반면에 응력의 관점에서는 설계 한계치에 가까워지는 것을 볼 수가 있다. 빔창의 두께가 두꺼워질수록 허용 빔 전류는 작아지지만 응력의 관점에서 안정적임을 알 수 있다. 하지만 빔창의 내부와 외부에서의 온도차가 급격히 늘어나며 그로 인한 열응력이 무시될 수 없는 경우가 된다. Table 5 를 볼 때, 빔창의 두께를 구조적인 안정성을 만족하는 한계 안에서 최대한 줄여줘야 함을 알 수 있다.

Table 5. CFX results for cases of 4 different window thickness with fixed window diameter 40cm

Window Thickness(mm)	2.0	2.5	3.0	3.5
Maximum Allowable Current Satisfying Temperature Limit(mA)	8.7	8.3	7.9	7.6
Maximum Pb-Bi Inlet Velocity(m/s)	1.11			
Maximum Pb-Bi Temperature(^{o}C)	500	500	500	500
Maximum Window Temperature(^{o}C)	526	539	553	569
Maximum Stress(MPa)	158	126	105	90

Table 6. CFX results for cases of 4 different window diameters with window thickness 2, 2.5mm

Window Diameter(cm)	50		48		45		40		35
Window Thickness(mm)	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0	2.5	2.0
Maximum Allowable Current Satisfying Temperature Limit(mA)	9.6	9.1	9.7	9.2	9.5	9.0	8.7	8.3	7.5
Maximum Pb-Bi Inlet Velocity(m/s)	0.8		0.87		0.97		1.11		1.24
Maximum Pb-Bi Temperature(^{o}C)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Maximum Window Temperature(^{o}C)	518	525	519	527	522	532	526	539	530
Maximum Stress(MPa)	198	158	190	152	178	142	158	126	138

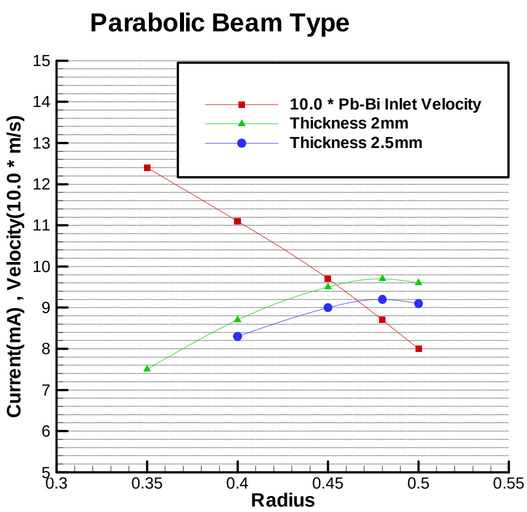
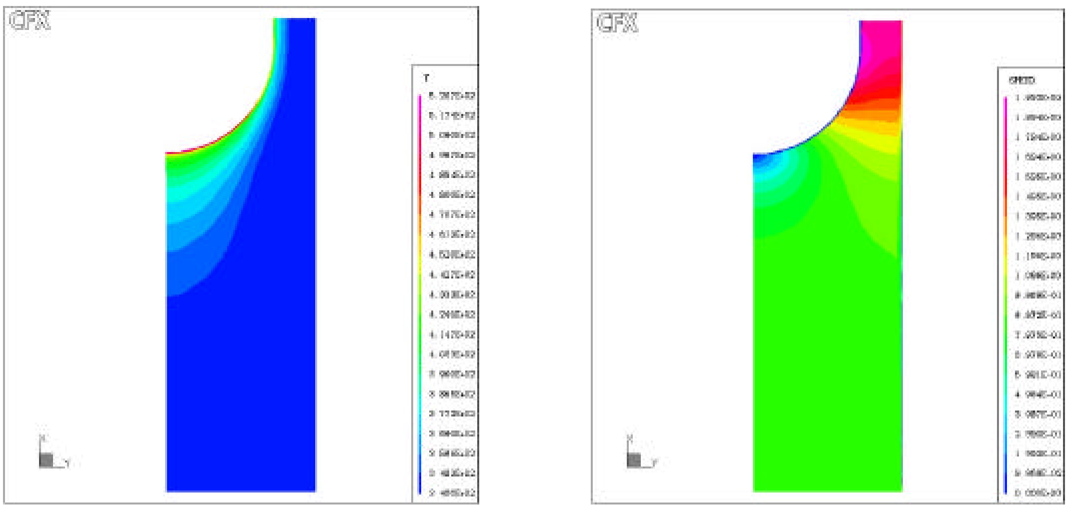


Figure 4. CFX results for cases of 4 different window diameters with window thickness 2, 2.5mm

다음은 빔창 직경의 변화에 다른 열수력 특성을 파악하기 위하여 빔창의 두께가 2mm, 2.5mm 인 경우, 빔창 직경을 50cm 에서 35cm 까지 5cm 씩 감소시키면서 계산을 수행하였으며 Table 6 은 그 결과를 보여주고 있다.

Table 6 을 보면 각 빔창의 두께에 대해서 빔창의 직경이 커질수록 허용 빔 전류가 커지다가 빔창 직경 48cm 를 기점으로 다시 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 빔창 직경과 함께 빔의 직경이 커지면서 상대적으로 빔의 밀도가 작아져, 빔창과 표적에 발생하는 열이 줄어들지만, 이로 인한 Pb-Bi 의 유입속도가 느려짐으로써 빔창에서의 냉각 효과가 반감되는 것을 의미한다. 또한 빔창의 반경이 커지면서 빔창 중심 부근에 형성되는 유동 정체 영역이 점점 넓어지게 됨으로써 냉각 효과가 감소하는 것도 하나의 원인이 될 수 있다. Figure 4 는 Table 6 을 그림으로 보여주고 있다.

Table 6 을 살펴볼 때, 빔창의 두께가 2mm 경우가 2.5mm 인 경우보다 각각의 빔창 직경에서 상대적으로 큰 허용 빔 전류를 받아들이지만, 빔창 직경반경이 40cm 이하인 경우를 제외하고 모두 설계 한계치인 허용응력 160Mpa 을 초과하고 있다. 결국 표적시스템의 구조적 안정을 고려하여 HYPER 가 현재 받아들일 수 있는 최대 빔 전류는 9.2mA 이며, 최적 빔창 반경은 48cm, 최적 빔창 두께는 2.5mm, 최대 Pb-Bi 유입속도는 0.87m/s, 최적 빔 직경은 43cm 임을 알았다. 물론 빔창의 직경 및 빔창의 두께를 좀 더 세밀한 간격으로 분할하여 계산을 수행할 경우, 더 높은 빔 전류를 허용하는 최적 설계 인자들을 도출 할 수 있으리라 예상된다.



(a) Temperature (b) Velocity

Figure 5. Temperature and velocity distribution of optimum designed target system

Figure 5 는 최적 설계 인자들을 적용하여 계산된 표적시스템의 유동 분포와 온도 분포를 보여주고 있다. 특히 가장 열이 많이 발생하는 빔창의 중심에서 유동 정체 영역이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 유동 정체 영역으로 인해 빔창의 냉각 능력이 현저히 떨어지게 되며 상대적으로 허용 빔 전류의 감소를 유발한다. 결국 빔창 중심에서 발생하는 유동 정체 영역을 제거하거나, 줄여줌으로써 허용 빔 전류를 높힐 수 있으리라 여겨진다.

5. 결 론

본 연구에서는 LAHET, CFX 등의 코드들을 사용하여 가속기 구동 미임계로 HYPER 의 표적시스템을 위한 최적 설계 인자를 도출하였다. 노심냉각재 및 표적 물질로 Pb-Bi 를 사용하였으며, 빔창 물질로는 9Cr-2WVTa 를 사용하였다.

포물선형 빔에 대하여 빔창의 직경, 빔창의 두께, pb-pi 유입속도, 빔의 지름등을 변경시키면서 HYPER 가 최대로 수용할 수 있는 빔 전류를 구했다. HYPER 가 수용 가능한 최대 빔 전류는 빔창의 직경 48cm, 빔의 직경 43cm, pb-pi 유입속도 0.87m/s, 빔창 두께 2.5mm 일 때, 9.2mA 로써 요구되는 빔 전류 20mA 에 못 미치는 것을 알았다.

요구되는 빔 전류의 46%밖에 만족 못하는 현재의 표적시스템은 다음과 같은 개선책을 이용하여 보완될 수 있다.

첫째, CFX 계산 결과 빔창의 중심에 유동 정체 영역이 존재하였으며, 이로 인한 빔창 냉각 능력 저하는 빔창에서의 온도 상승과 직결되는 문제이니 만큼 이 영역을 제거하거나 줄여줌으로써, 허용 빔 전류를 높힐 수 있으리라 기대되며, 이는 표적 관로의 형상 변화나 bypass injection 등을 도입함으로써 가능하리라 여겨진다.

둘째, 빔 밀도 분포에 있어서도 포물선 형 빔보다는 상대적으로 빔 밀도가 작은 균일빔이나 스캔빔등을 적용하여 빔창이나 Pb-Bi 에 발생하는 열을 줄여줌으로써, 허용 빔 전류를 높일 수 있을 것으로 기대되며 현재 연구 수행중에 있다.

셋째, 빔창 두께가 얇을수록 큰 빔 전류를 받을 수 있으므로 현재의 방법과 달리 빔창의 두께는 줄이고, 응력이 많이 발생되는 원통형 빔관의 두께는 키워주는 비균일 두께 빔창을 채택한다면, 역시 허용 빔 전류가 상승되는 효과를 보리라 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. WON S. PARK et al., “Transmutation Technology Development,” Korea Atomic Research Institute, KAERI/RR-2117/2000 (2000).
2. Park, W. S. et al., 1997, Development of Nuclear Transmutation Technology, KAERI/RR-1702/96.

3. 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.

4. Klueh, R. L., 1996, Experience with Ferritic/martensitic Steels for Fusion Application, Proceedings of International Workshop on Spallation Materials, 3.3-3.26.

5. Rust, J. H., 1979, Nuclear Power Plant Engineering, Haralson Publishing Company, p385.

6. Prael, R. E. et al., 1989, User Guide to LCS : The LAHET Code System, LA-UR-89-3014.