

미임계로 표적빔창의 열수력 해석

송민근*, 주은선**, 최진호**, 송태영***, 탁남일***, 박원석***

Thermal Hydraulic Power Analysis of the HYPER Target Beam Window

Min-Geun Song*, Eun-Sun Ju**, Jin-Ho Choi**,
Tae-Young Song***, Nam-Il Tak*** and Won-Sok Park***

Key Words : HYPER(가속기구동 미임계로), Nuclear Transmutation(핵변환), Spallation Target(파쇄표적)
Incineration(핵중소멸)

Abstract

The nuclear transmutation technology to incinerate the long lived radioactive nuclides and produce energy during the incineration process is believed to be one or the best solutions. HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) is the accelerator driven transmutation system which is being developed by KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute). Lead-bismuth(Pb-Bi) is adopted as a coolant and spallation target material. In this paper, we performed the thermal-hydraulic analysis of HYPER target using the commercial code FLUENT, and also calculated thermal and mechanical stress of the beam window using the commercial code ANSYS. It is found that there is an optimum value for the window diameter and the maximum allowable beam current can be increased to 17.3 mA for the inner diameter of windows, 40 cm. Finally, the other shapes such as uniform or scanned beam were considered. The results of FLUENT calculations show that the uniform type is preferable to the other shapes of the beam in terms of the window and target cooling and the maximum window temperature is lower than that of the parabolic beam by 58 °C for the beam current, 13 mA.

1. 연구목적 및 배경

사용 후 핵연료의 처리 문제와 관련하여 다양한 연구들이 전 세계적으로 진행되어져 왔다.^[1,2] 그 중 최근 주목받고 있는 연구분야로서 가속기구동 미임계 핵변환로(Accelerator-Driven transmutation System, ADS)를 들 수 있다.^[3] 국내에서는 한국원자력 연구소가 1997년부터 원자력 중장기 사업의 일환으로 가속기 구동 미임계 핵변환로 HYPER(Hybrid Power Extraction Reactor)의 개념 설계에 관한 연구를 진행중이다.^[4,5] HYPER는 미임계 상태에서의 운전을 위해 외부의 중성자원이 필요하며, 이를 위해서 1GeV 양성자 빔을 미임계내의 Pb-Bi 표적에 조사해서 생성되는 핵파쇄 중성자를 이용하는 시스템이다. 가속기에서 생성되는 고출력의 양성자빔으로 인하여 Pb-Bi와 가속기 빔창의 급격한 온도상승이 유발된다. HYPER 시스템의 건전성 유지를 위해서는 표적물질의 열제거가 중요하며, 고출력 가속기의 적용에 있어 가속기 빔창의 냉각이 중요한 인자로 부각되어졌다.

본 연구에서는 효과적인 표적연구를 위해 액체 가속기 표적 및 냉각제인 Pb-Bi의 열수력해석 및 가속기 빔창의 온도상승에 따른 냉각특성 및 가속기 빔창의 구조적인 안정성을 해석하였다. 열수력해석은 FLUENT로, 구조해석은 ANSYS를 사용하였다. 파쇄표적과 빔창의 열발생량은 LCS(LAHET Code System)로 계산된 결과를 이용하였다.

2. HYPER형상 및 설계변수

Fig. 1 은 HYPER의 기하학적 형상이다. 계산효율을 위해 출구길이에 따른 Pb-Bi 속도, 압력 및 온도의 분포를 비교하여 최적의 계산영역을 결정하였다.

빔창 하단 인접부의 Pb-Bi는 고출력 가속기에서 나오는 양성자빔에 의해 급격하게 가열되며 이로 인해 발생하는 열량은 빔의 밀도 변화에 따라 아래의 식(1), (2), (3)으로 표현되며, 반구형상인 빔창주위의 효율적인 냉각을 위해 Parabolic, Uniform, Scanned Beam 분포를 가진 열생성을 고려하였다.

빔창의 수명은 고온의 열발생에 따른 Thermal Stress뿐만 아니라, 화학적 반응 및 부식작용으로 야기되어지며 따라서 Pb-Bi 최고 속도는 2 m/s 이하로 만족되어야한다.

Fig. 1에 표시된 사각영역에서 양성자빔에 의해 고온의 열이 생성되며 Parabolic 형태의 전류 밀도에 따른 열생성량은 아래의 식으로 표현된다.

$$H \cdot G_{parabolic} = C_1 \times 10^{10} \times \frac{2I}{\pi R^4} \times (R^2 - r^2) \quad (1)$$

unit : (W / m³)

I : Proton beam current (mA), R : Proton beam radius (cm)
r : Distance from beam center point (cm)

Fig. 1의 축대칭 단면에서 원형의 빔창아래에는 빔창의 냉각과 파쇄표적으로 사용되는 Pb-Bi가 흘러가며, 양성자빔에 의한 온도분포는 빔창표면 형상과 전류밀도 분포에 의해 결정된다.

* 경상대학교 대학원, s_friend@gshp.gsnu.ac.kr
** 경상대학교 기계항공공학부
*** 한국원자력연구소

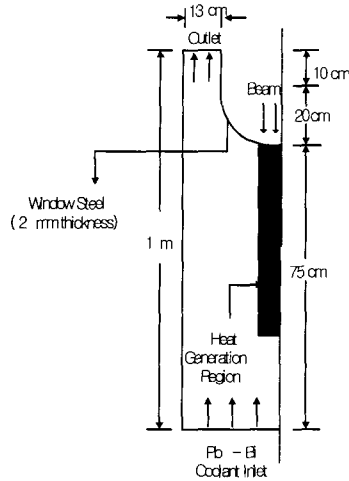


Fig. 1 Geometry of HYPER model

Pb-Bi의 입구경계조건으로 340 °C, 1.1 m/s 로 가정하였으며 상층부의 Pb-Bi 액주에 의해 계산영역의 출구에 작용하는 정수압은 16.3 atm이다. 열발생에 사용되는 상수로서 빔창지름은 40cm, 빔 지름 35 cm 일 경우 Parabolic 빔 시뮬레이션 수행시 C₁, Uniform 빔 시뮬레이션 수행시 C₂, Scanned 빔 시뮬레이션 수행시에는 C₃ 값을 이용하였으며, 세부적인 값은 Table 1에 기술하였다. 상기의 열발생 상수는 LCS에서 계산되어진 값이다.

Table 1 The constant of heat generation

Layer	C ₁	C ₂	C ₃
Windows 2mm	2.20	23.6	1.94
Pb-Bi 0-2cm	2.56	25.9	2.48
2-4 cm	2.53	24.7	2.39
4-6 cm	2.40	23.5	2.29
6-8 cm	2.27	21.8	2.09
8-10 cm	2.09	20.0	1.88
10-20 cm	1.59	15.1	1.37
20-30 cm	0.93	8.8	0.73
30-40 cm	0.51	5.0	0.35
40-50 cm	0.28	2.9	0.15
50-60 cm	0.14	1.2	0.06

Uniform 빔전류 분포에서는 빔 조사 직경 35 cm 내에서 열발생이 일정하지 않고 깊이별로 패턴이 있으나 변동폭이 미소하여 상수로 가정하였다. 가속기에서 나오는 빔전류의 양을 I (mA) 라고 할 때 열발생량은 (2)식과 같이 표현된다.

$$H \cdot G_{uniform} = C_2 \times I \quad \text{unit : (W / m}^3\text{)} \quad (2)$$

Scanned 빔전류 형태에서는 빔창지름 40 cm에 빔 지름 15 cm인 parabolic 형태의 빔을 시뮬레이션 하였다. 반지름 R cm인 빔이 scan 시에 회전하면 반지름 2R cm인 빔처럼 형성되고 이때의 열발생은 아래의 식(3)과 같이 표현된다.

$$H \cdot G_{scanned} = C_3 \frac{2I}{\pi R^4} \{ R^2 - (r-R)^2 \} \quad \text{unit : (W / m}^3\text{)} \quad (3)$$

Table 2는 본 연구에 사용된 기본 변수들과 계산시 적용된 치수와 빔창 및 표적재료를 나타내었으며, 이는 핵과쇄표적 및 빔창에 대한 세부사양이다. 가속기 빔창재료로서 9Cr-2WVTa와 빔창 냉각 및 가속기 표적으로서 Pb-Bi를 사용하였다.

Table 2 Basic parameters of the target area

Parameter	Value
Target material	Pb-Bi (coolant)
Beam window material	9Cr-2WVTa
Beam window coolant	Pb-Bi
Window thickness	2 mm
Window shape	Spherically curved (radius 20 cm)
Beam tube material	9Cr-2WVTa
Beam tube cross-section	radius 20 cm, circle

Fig. 2는 전체 HYPER시스템의 작동영역 및 빔창의 부착 위치를 나타낸다. Core형태로 존재하는 연료봉의 그룹과 냉각제 및 표적물질로서 사용되는 Pb-Bi의 작동 경로를 보여준다. 반구형 빔창 내부는 진공상태이므로 고출력 가속기에 의한 발생열을 배출하지 못하며, 빔창의 최고온도분포는, 냉각제로서 사용되는 Pb-Bi와 반구형 빔창이 접하는 유동의 정체점 상단에 존재함을 예측할 수 있다.

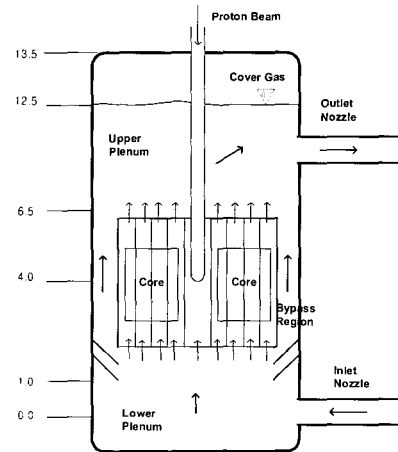


Fig. 2 Geometrical configuration of HYPER system

3. 계산결과 및 고찰

3.1 FLUENT 계산결과

계산시간의 절약을 위해 Geometry와 동일한 형상의 2D Axisymmetric 조건으로 모델링 하였고, 수렴의 가속화와 효율적인 자료변환을 위해서 정렬격자를 사용하였으며, 빔창벽면의 난류모사와 벽함수의 적용을 위해 $30 < y^+ < 300$ 의 범위내에서 격자생성을 하였다. FLUENT를 이용하여 Steady-state 상태의 유동과 열전달 문제를 선형하여 계산하였고, 계산된 결과로서 온도 및 압력분포 등의 값을 ANSYS에 입력값으로 대입하여 구조해석을 진행하였다. 유동의 정도있는 모사와 계산시간의 단축을 위해 빔창벽면과 유동의 경계점에 세밀한 격자계를 형성하였으며, 이때 생성된 총격자수는 38,800개이다. 난류모델은 표준 k-ε 난류모델 (Standard k-ε model)을 사용하였고 벽함수는 Standard-Wall Function을 적용하였다. 이산화방법으로는 Second

Order Upwind을 사용하였고, 압력보정에는 SIMPLEC 알고리즘을 적용하였다. 부력항을 고려하여 Boussinesq 가정을 하였다.

Pb-Bi 최대속도는 표적 down stream 환형부에서 발생하는데 그 값은 대략 1.84 m/s로서 임계속도 2 m/s이내를 잘 만족하였다. 그러나 표적빔창의 반구형상으로 인해 빔창 중앙부에서 flow stagnation이 존재하였다. Flow stagnation 영역에서의 열전달 부족으로 인해 Fig. 3의 축방향 온도 분포결과와 같이 빔창 중앙의 상단부에서 최고 온도영역이 존재하였다. 계산영역은 반구형 빔창을 중심으로 길이방향 1m반경 이내 영역을 모델링하였고, Pb-Bi 출구측 경계조건은 실제 조건과 동일하게 정수압(16.3 atm.)조건을 가산하여 계산하였다. 이 때 Pb-Bi상부의 Cover gas 층의 압력도 가산되었다. 빔창과의 인접한 영역에서의 격자의 존도를 검증하기 위해 축방향과 반경방향으로의 계산을 진행하였다. Fig. 3은 축방향의 격자 크기에 따른 온도 분포이고, Fig. 4는 반경방향의 격자크기에 따른 온도분포이다.

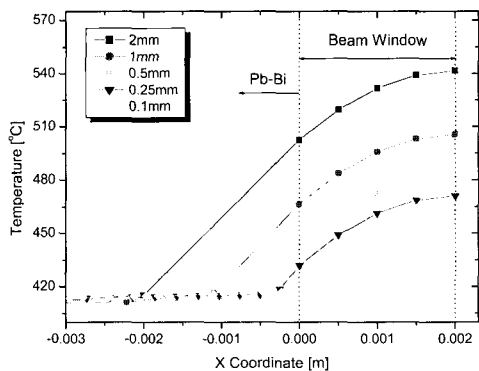


Fig. 3 Temperature distribution of axial distance

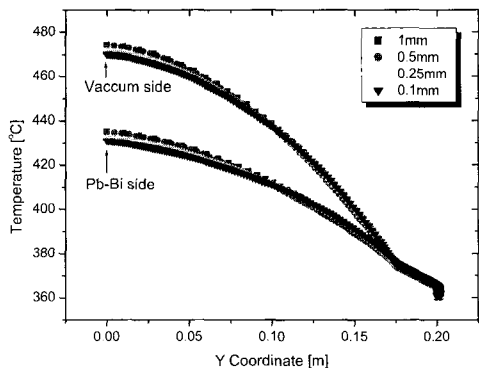


Fig. 4 Temperature distribution of radial distance

핵변환의 효율을 위해 고출력의 양성자 가속기가 요구되는 HYPER에서 빔창의 효율적인 냉각은 설계의 중요한 인자이다. 빔창 재료인 9Cr-2WVTa는 600 °C이하에서 내구성 있게 사용 가능하며, 가속기표적 및 빔창의 냉각제로 사용되는 Pb-Bi는 500 °C이하에서 건전하게 사용 가능하다. 빔창 냉각을 위해 본 연구에서 고려되어진 여러 방법들 중 Pb-Bi 입구 속도 증가는 빔창의 냉각에 별다른 영향을 미치지 못했는데, 이는 유동의 상부에 존재하는 정체점 부근에 최대 온도점이 존재하기 때문이다. 빔창의 효율적인 냉각을 위한 최적의 대안으로 3가지 빔전류 분포의 양성자 가속기 출력을 고려하여 최고 열발생 지점을 정체점 상부에서 유동 및 열전달이 활발한 영역으로 이동시키고자 하였다. 빔전류 13 mA 일 경우의 Parabolic, Uniform, Scanned 빔 형상에 따른 빔창표면의 온도 분포는 Fig. 5에 나타내었다.

Parabolic 빔의 경우 빔창 양면의 표면온도차가 40 °C로 계산되어지는데 3가지 빔출력의 경우중 동일한 전류일 경우 빔창에서 최고 온도분포를 보이고 있다. 따라서 thermal stress도 빔창 중앙에서 가장 클 것이라고 예측된다. Uniform 빔의 경우 온도가 전체적으로 낮고 빔창의 온도분포 차이가 20 °C로 균일하나 빔출력의 불연속점에 의한 온도편차로 Thermal Stress에 따른 구조적으로 불안정 요소가 존재한다.

빔창의 온도 하강의 인자로서 빔지름의 증가가 있는데 빔지름의 증가에 따라서 빔창 최고온도는 급격하게 감소하며 이는 양성자 빔의 밀도 자체가 감소함에 따른 것이며 중성자원 생성 효율과 설계의 여러 제약 조건으로 인해 빔지름의 변경은 불가능하므로 결정되었다. 따라서 Pb-Bi 최대 유로 크기는 66 cm, 빔창지름은 40 cm로 고정되었다.

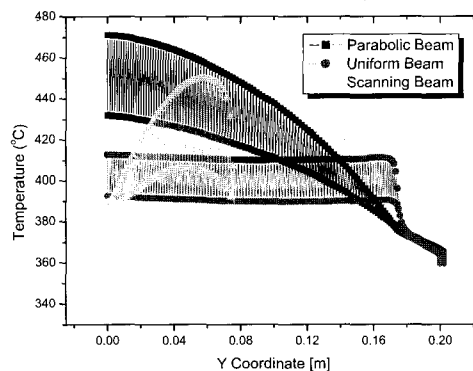


Fig. 5 Temperature distribution of the beam windows (I=13 mA)

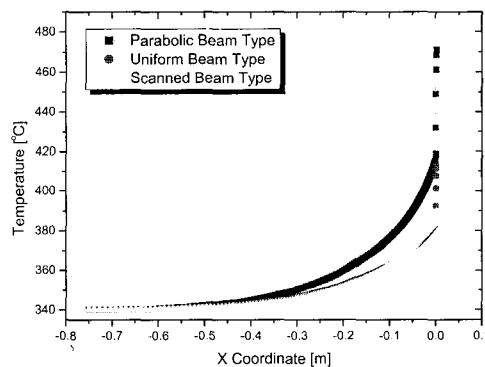


Fig. 6 Temperature distribution of Pb-Bi (axial direction)

Fig. 6은 3가지 빔종류에 따른 축방향 Pb-Bi의 온도분포를 나타낸다. 최고온도 분포는 Parabolic > Uniform > Scanned Beam type 순이며, 축방향 온도 분포는 Pb-Bi 최고온도분포와는 일치하지 않는다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 동일전류일 경우 Parabolic > Scanned > Uniform Beam type으로 최고온도가 존재한다. 온도분포 중 특히 빔창과 Pb-Bi가 접하는 부위에서 온도 jump가 관찰되었다. 따라서 빔창 및 Pb-Bi 최대온도의 예측을 위해서는 이 부위의 정확한 유동 및 온도 예측이 필수적이다.

Thermal Stress관점에서는 Uniform빔 형상에 Parabolic 빔 형상의 온도 분포를 조합한 형태가 안정적일 것으로 예측된다.

Fig. 7은 빔창 두께에 따른 빔창내부의 온도분포를 나타낸다. 빔창의 두께가 두꺼워 질수록 구조적으로는 안정하지만 가속기에 의한 열발생량이 증가하므로 고출력이 요구되는 HYPER에서는 2 mm 빔창이 최적치로 선정되었으며 이때 정수압에 의한 Mechanical Stress는 약 100 MPa로 계산되었다.

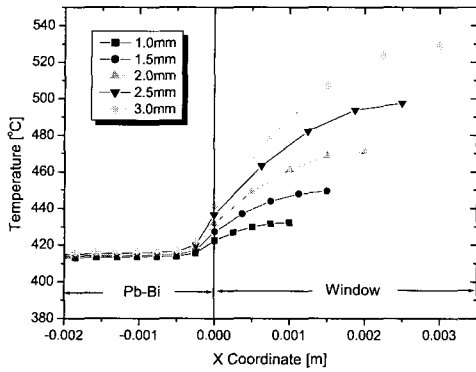


Fig. 7 Temperature distribution of variable beam window thickness

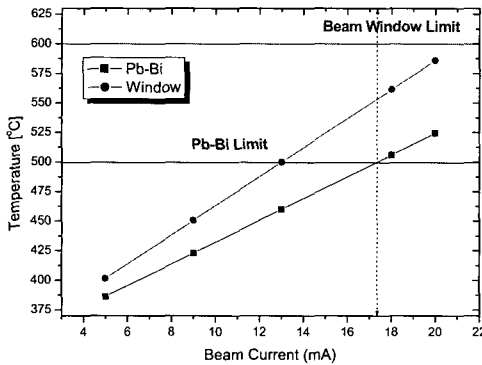


Fig. 8 Optimal design parameter (35 cm parabolic beam type)

그림 8은 35 cm Parabolic 빔형상에 따른 최대 온도 분포를 나타낸다. 설계기준값으로 제시된 빔창 임계온도 600 °C 이하, Pb-Bi 임계온도 500 °C 이하를 만족하는 빔전류로는 17.3 mA가 제시되었다. 따라서 본 연구에서 고려한 미입계 표적의 허용가능 빔전류량은 17 mA 이상임이 예측된다. Table 3은 난류모델에 따른 빔창 최고온도 및 빔창표면에 작용하는 최고 압력값을 나타내며 two-equation model인 k-ε model의 계산값과 RSM의 계산값은 작은 편차를 보였다.

Table 3 Maximum temperature and pressure distribution of the Beam window

Turbulence model	Temperature (°C)	Pressure (atm.)
Spalart-Allmaras model	695.7	16.16
k-ε model	Standard	470.9
	RNG	487.7
	Realizable	471.6
Reynolds Stress Model	477.0	16.23

3.2 ANSYS 계산 결과

빔창이 운전범위 내에서 건전성을 유지하기 위해서는 빔창의 최대온도가 소재의 용융점 이하이어야 하며 온도, 압력에 의한 기계적인 응력에도 견디도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 ANSYS를 이용하여 빔창에 작용하는 압력 및 온도에 의한 응력을 계산하여 빔창구조의 안전성 및 최대 허용 빔 전류량 등을 계산하였다. 빔창재료로 사용한 9Cr-2W-Ta의 용융점은 600 °C이고, Fluent에 의하여 계산된 열, 유동의 결과를 살펴보면 빔창의 온도분포는 약 500~600 °C 범위이므로 본 해석에서는 빔창

의 탄성계수를 고정하여 해석하였다. 해석에 사용한 유한요소 모델은, 유동해석에 사용된 Fluent와 동일한 격자구조를 가지고 있다. 해석에 사용한 요소는 2차원 축대칭요소이며, 해석에 사용한 전체 절점수는 5136개이고, 요소수는 4275개다.

최대 정압값은 빔전류와 빔직경과는 미소한 상관 관계를 보였으며 이는 전체적인 경향에서는 무시할 수 있을 정도였다.

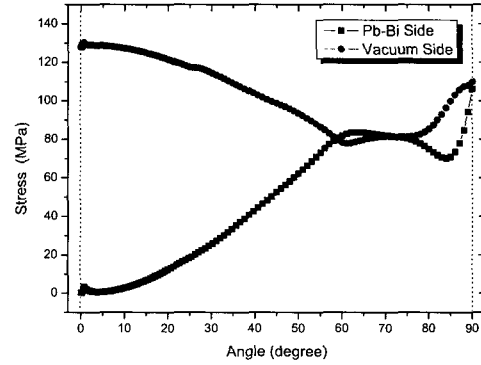


Fig. 9 Stress distribution of the beam windows

Fig. 9는 빔창 양쪽 표면의 stress 분포이다. 계산된 결과를 바탕으로 분석해 보면 Thermal stress와 Mechanical stress가 서로 상쇄 효과가 있음을 알 수 있다. 즉 빔창의 열적 팽창을 정수압과 정압에 의해 어느 정도 감쇄시킴을 확인할 수 있었다.

4. 결론

HYPER의 냉각재와 가속기의 표적물질로서 Pb-Bi를 가속기 빔창재료로서 9Cr-2W-Ta의 물성값들을 적용하여 FLUENT는 열수력계산, ANSYS는 최종 stress 계산에 이용하여 다양한 조건에서 계산한 결과는 아래와 같다.

1. 정체점 상부의 최고 온도값을 감소시키기 위해서 Parabolic, Uniform, Scanned type의 3종류의 빔형상의 열발생량을 이용하여 최적의 빔전류 형상을 선택하였다.
2. 35 cm Parabolic Beam type에서 모든 임계조건내에서 운전할 수 있는 최대 전류값은 17.3 mA로 계산되었다. 이 때 total(thermal+mechanical) stress는 약 130 MPa로 계산되어 졌으며 안정적으로 운전 가능한 영역이었다.
3. Stress계산 결과에 의해 thermal stress와 mechanical stress가 서로 상쇄 효과가 있었음을 추측 할 수 있다.

참고문헌

- [1] National Research Council, "Nuclear Waste", Technologies for Separations and Transmutation, National Academy Press. (1996).
- [2] OECD/NEA, "Draft of Expert Group Report for Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation System Studies", NEA/PTS/DOC. (1984).
- [3] Carlo Rubbia, "CERN Concept of ADS, CIEMAT", IAEA Technical Committee Meeting. (1997).
- [4] 박원석외 4인, "장수명 핵종 핵변환 기술개발", KAERI/RR-1638/95. (1995).
- [5] Won S. Park, et al, "HYPER(Hybrid Power Extractor Reactor) : A system for clean nuclear energy. Nuclear Engineering and Design 2000", (2000), pp.155-165.