

HYPER 빔창의 열수력 해석에 의한 운전특성에 관한 연구

송민근*, 최진호**, 주은선**, 송태영***

A Study on the Operating Characteristics by Heat Flow Analysis of HYPER Beam Window

Mingeun Song*, Jinho Choi**, Eunsun Ju**, Taeyoung Song***

Key Words : HYPER(가속기구동 미임계로), Spallation Target(파쇄표적), Transmutation(변환), Pb-Bi(납/비스무스), Thermal-Hydraulic Analysis(열수력 해석)

Abstract

A spent fuel problem has prevented the nuclear power from claiming to be a completely clean energy source. The nuclear transmutation technology to incinerate the long lived radioactive nuclides and produce energy during the incineration process is believed to be one of 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). Some major features of HYPER have been developed and employed. On-power fueling concepts are employed to keep system power constant with minimum variation of accelerator power. A hollow cylinder-type metal fuel is designed for the on-line refueling concept. Lead-bismuth(Pb-Bi) is adopted as a coolant and Spallation target material. HYPER is a subcritical reactor which needs an external neutron source. 1GeV proton beam is irradiated to Lead-bismuth(Pb-Bi) target inside HYPER, and spallation neutrons are produced. When proton beams are irradiated, much heat is also deposited in the Pb-Bi target and beam window which separates Pb-Bi and accelerator vacuum. Therefore, an effective cooling is needed for HYPER target.

In this paper, we performed the thermal-hydraulic analysis of HYPER target using FLUENT code, and also calculated thermal and mechanical stress of the beam window using ANSYS code.

기호설명

- I : Proton Beam current (mA)
- R : Proton Beam radius (cm)
- r : distance from Beam center point (cm)

1. 서론

장수명핵종 소멸처리의 한 방법으로 한국원자력연구소에서는 가속기와 고속로를 결합한 개념

인 가속기구동 미임계로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 연구해 왔다. 가속기구동 미임계로는 미임계 상태에서의 운전을 위해서 외부의 중성자원이 필요하고 HYPER는 1GeV 양성자빔을 미임계내의 Pb-Bi 표적에 조사해서 생성되는 핵파쇄 중성자를 이용하는 시스템이다.

HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)의 냉각제 및 가속기 표적물질인 Pb/Bi의 냉각효과 검토는, 가속기에 의한 양성자빔의 고출력으로 인한 Pb/Bi의 급격한 온도상승 문제로 야기되어진다. 표적시스템의 건전성 유지를 위해 표적물질의 열제거가 중요하며 안정된 고출력의 가속기

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교 수송기계공학부 교수, 항공기 부품 기술연구센터, 생산기술연구소

*** 한국원자력연구소 연구원

를 설계하기 위해 가속기 빔창의 냉각이 중요한 인자로 부각되어져 왔다.

본 연구에서는 효과적인 표적연구를 위해 액체 Pb/Bi 표적의 온도분포 및 속도분포, 가속기 빔창의 온도상승에 따른 냉각방법과 냉각조건 연구 및 가속기 빔창의 냉각 가능성 조사를 수행하였다. 이를 토대로 액체 Pb/Bi의 입사속도를 결정하기 위해 가속기 표적물로서의 입사속도의 결정과 가속기 빔창 냉각제로서의 입사속도를 계산하였다. 상용CFD Code인 FLUENT를 사용하여 빔창 주위의 열 수력 문제를 2차원 축대칭 조건으로 해석하였으며, 계산되어진 여러 조건들을 토대로 Stress 해석을 ANSYS를 이용하여 수행하였다. 이때 파쇄표적과 빔창의 열발생량은 LCS (LAHET Code System)를 사용하였다. 빔창의 안정성 평가는 열수력에 의한 Stress뿐만 아니라 화학적인 반응과 부식으로 인해 발생하는 부분도 고려되어야 한다. FLUENT에서 열수력 문제에 따른 열 전달은 Quasi-Steady State상태에서 해석하였다.

ANSYS에서는 FLUENT에서 계산되어진 값들을 대입하여 Mechanical Stress와 Thermal Stress를 계산하여 비교 검토하였다.

2. 기본구조 및 운전특성

Fig. 1 은 HYPER 모델의 기하학적 형태를 나타내고 있으며 계산시간을 줄이고 수렴성을 높이기 위한 단순격자로서 2차원 Axisymmetric model을 적용하여 계산하였다.

빔창 아래부분의 Pb-Bi는 Proton Beam에 의해서 가열되어지며 이로 인해 발생되어지는 경향은 크게 5개의 영역으로 나누어 볼 수 있다.

Fig. 2 와 같은 형태로 영역별 열 발생율을 보이며 그 열 발생량은 식(1)에 잘 나타나 있다.

2차원 단면 형상에서 원형모양의 빔창아래에는 빔창의 냉각과 파쇄표적으로 사용되는 Pb/Bi가 유입되고 있으며, 양성자빔에 의한 온도분포는 빔창표면 형상에 따라 포물선 형태의 분포를 보이고 있다. 이 때 Pb/Bi의 입구온도는 250℃였으며 상부 Pb/Bi액체에 따라 출구영역에 작용하는 정수압은 16.3기압이 작용하였다.

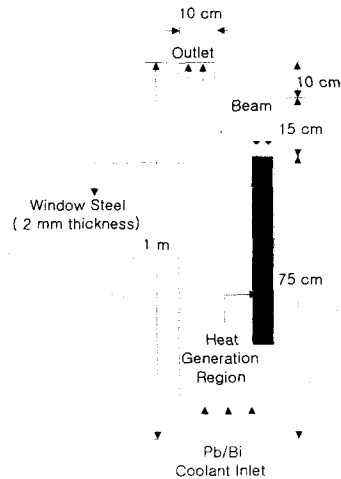


Fig. 1 Geometry of HYPER model

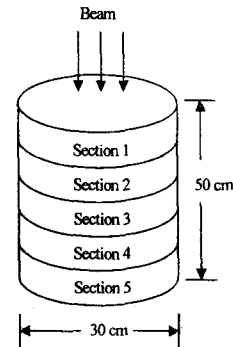


Fig. 2 Irradiation zone and section definition

각각 영역에서의 Heat generation은 식(1)에 의해 계산되어지며 양성자빔의 전류와 빔반경, 빔 중심으로부터 거리에 따라 열발생율이 달라진다. 이 때 수평방향으로 계산되어진 온도분포는 아래의 상수를 곱하여 수직방향의 온도분포를 계산할 수 있다.

$$1.88 \times 10^{10} \times \frac{2I}{\pi R^4} \times (R^2 - r^2) \quad (1)$$

unit : (W / m³)

I = 전류 (mA), R = 빔의 반경 (cm),

r = center 에서 부터 거리 (cm)

i) Horizontal plane

if : $r \leq R \rightarrow (1)$, $r > R = 0$

ii) Vertical plane

if depth : 0~10 cm calculated by : (1)

if depth : 10~20 cm calculated by : $0.59 \times (1)$

if depth : 20~30 cm calculated by : $0.31 \times (1)$

if depth : 30~40 cm calculated by : $0.14 \times (1)$

if depth : 40~50 cm calculated by : $0.07 \times (1)$

if depth : 50~ cm calculated by : $0 \times (1)$

Table 1. Basic parameters of the target area

Parameters	Values
Target material	Pb/Bi (coolant)
Beam window material	9Cr-2WVTa
Beam Window coolant	Pb/Bi
Window thickness	2mm
Window shape	spherically curved (radius 15cm)
Beam tube material	9Cr-2WVTa
Beam tube cross-section	radius 15 cm, circle

Fig. 3은 전체적인 HYPER시스템의 구조와 중성자 빔창의 실제형상을 보여준다. 또한 Core형태로 존재하는 연료봉의 그룹들과 냉각제로서 사용되는 Pb-Bi의 작동 경로를 잘 나타내고 있다.

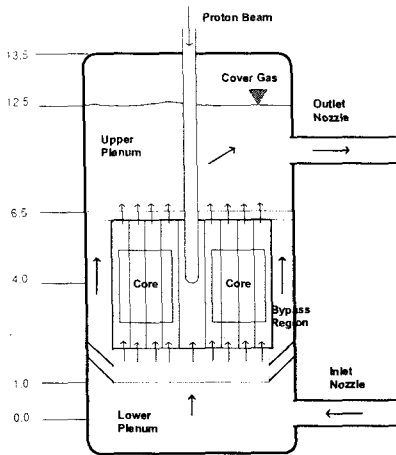


Fig. 3 Geometrical configuration of HYPER system

반구형 빔창 내부는 진공상태이므로 양성자빔에 의한 발생열을 배출하지 못하는 특성이 있고 빔창의 최고온도 분포는 Coolant인 Pb/Bi가 반구형 빔창과 접하는 유동의 정체점 상단에 존재함을 확인할 수 있다. Table 1은 양성자빔 Target에 대한 자세한 사양들을 보여주고 있으며 빔창 재료인 9Cr-2WVTa와 냉각수로 사용되는 Pb/Bi에 대해서 자세히 기술하였다.

3. 결과 및 고찰

실제 문제 계산시에는 Computation Time을 줄이기 위해 Geometry와 동일하게 접근하여 2D Axisymmetric조건으로 모델링 하였다. 열수력 문제를 먼저 풀고 계산된 온도나 압력 등의 자료들을 이용하여 구조적인 부분을 해석하였다. 유동을 해석하기 위한 난류모델은 standard k-ε 모델을 사용하였으며 계산시간은 25,000개의 격자점에서 약1시간 정도 소요되었다. 빔창과 Pb/Bi의 온도분포는 양성자빔의 중심에서 외각으로 갈수록 낮아지는, Gauss함수 형태의 분포를 보였으며 2mm두께를 가진 빔창과 Pb/Bi가 Coupled된 부분은 선형적인 온도분포를 보였고, 진공부위와 접하는 빔창의 온도분포는 불연속적인 온도 분포를 보여 주었다.

실제 계산은 구형빔창을 중심으로 길이방향 1m 반경 영역만 계산하였지만 Pb/Bi 출구측 압력은 실제 조건과 동일하게 정수압(16.3 atm.)조건을 적용하여 계산하였고 상부의 가스층으로서 액추에이트 역할을 하는 Cover Gas층의 압력도 가산하여 제시되어졌다..

3.1 열 수력 계산 결과

Table 2는 4가지의 빔전류, 4가지의 Pb/Bi입구 속도 그리고 4가지의 빔직경을 기준으로 계산하였을 경우의 빔창의 최대온도분포를 나타낸다.

빔창 재료인 9Cr-2WVTa는 700°C이하에서 내구성 있게 사용될 수 있으므로 Table 2에서 음영으로 표시되어진 부분의 조건들이 실제적으로 HYPER시스템을 운전할 수 있는 조건들이 되었다. 여러 조건들 중 냉각수의 입구 속도는 빔창의 냉각에 별다른 영향을 미치지 못했는데 이는 유동

의 상부에 존재하는 정체점 부근에 최대 온도점이 존재하기 때문이라고 할 수 있다.

빔지름의 증가에 따라 빔창 최고온도는 급격하게 감소하며 이는 열발생량 자체가 감소함에 따른 것이며, 빔 전류가 감소함에 따라서도 동일한 경향을 보이고 있다. 따라서 빔창을 크게하고 빔전류를 낮추는 방법이 빔창 최고 온도를 낮추는 방법이며, 최적의 빔전류와 빔지름을 찾는 최적설계의 개념으로 본 연구는 진행되었다.

Table 3은 빔창이 냉각수 Pb/Bi에 의해 받는 최대 정압값을 나타내고 있으며, 실제적인 전체 Geometry에서의 정수압이 가산되어진 값이다.

Table 2 Maximum temperature of beam window (unit : °C)

		5cm	10cm	15cm	20cm
2mA	5 m/s	1675	644	431	353
	10 m/s	1654	634	425	349
	15 m/s	1643	629	421	347
	20 m/s	1632	624	418	345
4mA	5 m/s	3100	1038	612	457
	10 m/s	3058	1019	600	449
	15 m/s	3037	1008	593	444
	20 m/s	3015	998	587	440
6mA	5 m/s	4524	1433	793	561
	10 m/s	4462	1404	775	548
	15 m/s	4430	1387	764	541
	20 m/s	4397	1372	756	536
8mA	5 m/s	4726	1827	974	665
	10 m/s	4726	1788	950	647
	15 m/s	4726	1766	936	638
	20 m/s	4726	1746	925	631

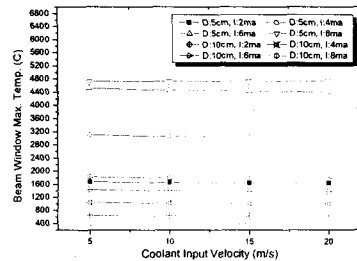
최대 정압값은 양성자빔전류와 빔직경과는 미소한 상관관계를 보였으며 이는 전체적인 경향에서는 무시할 수 있을 정도였다. 차후로 계산되어질 stress와 관련하여 실제로 계산된 결과를 분석해 보면 Thermal stress와 Mechanical stress가 서로 상쇄 효과가 있음을 알 수 있다. 즉 열적 팽창을 정수압과 정압에 의해 어느 정도 감쇄시킴을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 냉각수 Pb/Bi의 입구 속도에 따라 각 조건들에 따라 빔창의 최대 온도값을 나타내었다. 각각의 최대 빔창온도는 Pb/Bi 입구 속도가 증가할수록 미소하게 감소하는 경향을 보였으며 전체적으로 빔전류가 커질수록 그리고 빔지름이 작아질수록 온도가 높아지는 경향을 보인다.

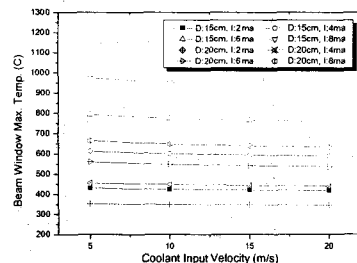
Table 3 Maximum static pressure of beam window (unit : atm.)

	min.	max.
5 m/s	15.6	19.5
10 m/s	13.27	26.89
15 m/s	9.84	38.8
20 m/s	4.3	71.6

Fig. 5는 빔지름이 커질수록 빔창의 최대온도가 급격하게 감소함을 보여준다. 동일한 빔전류 조건에서 최대출력을 얻도록 설계하려면 빔창의 지름을 크게하고 Pb/Bi의 입구속도를 낮추는 것이 효과적인 것이다. Fig. 4에서 보여준 바와 같이 Pb/Bi의 입구속도는 최대 빔창 온도를 감소시키지 못하고 있는데 이는 빔창의 최대온도점이 Coolant인 Pb/Bi가 빔창을 지나가는 정체점 상부에 존재함을 보여주고, 이는 실제로 구동되는 원자로에서는 펌프작동에 따른 유동의 섭동에 의해 어느 정도 감소되어지리라 예상된다.



(a) Beam diameter : 5 ~ 10 cm

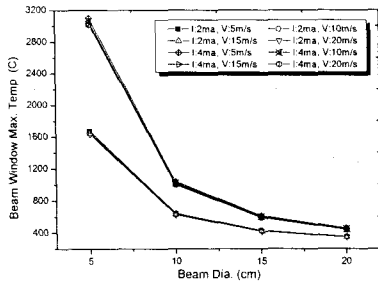


(b) Beam diameter : 15 ~ 20 cm

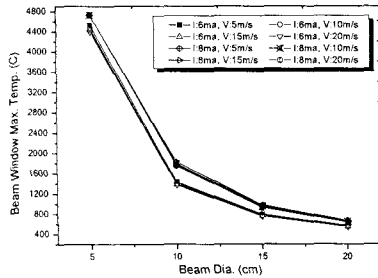
Fig. 4 Maximum Temperature of beam window

앞에서 계산되어진 온도분포에 따른 빔창의

Thermal stress와 Pb/Bi의 입구속도와 정수압에 따라 빔창에 전체적으로 작용하는 정압분포를 이용하여 빔창에 작용하는 Mechanical stress를 계산하여 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다.



(a) Beam current : 2~4 mA



(b) Beam current : 6~8 mA

Fig. 5 Maximum Temperature of beam window

3.2 구조해석 결과

Fig. 6, 7, 8은 최적설계조건 중 빔전류 6mA, Pb/Bi입구속도 5m/s, 빔지름 20cm, 빔창두께 2mm 일 경우의 Mechanical stress, Thermal stress, Total stress의 분포를 나타내고 있다.

Mechanical stress값은 약 110MPa 정도 계산되어졌으며 온도분포에 따른 열팽창에 의해 야기되는 Thermal stress는 대략 80MPa정도였다. 열팽창에 의해 늘어나는 방향과 Pb/Bi를 순환시키기 위해 공급되어지는 정압의 방향은 서로 반대 방향으로 작용되므로 전체 stress는 감쇄되어 약 150MPa정도로 계산되어졌으며 전체적으로 HYPER 시스템에서 운전가능한 영역의 결과값으로 제시되어졌다.

열응력 계산은 Quasi-Steady State의 조건에서

계산되어졌다.

Fig. 6 에서 Mechanical stress는 반구의 형상에서 보다 원형에서 크게 분포하는데 실제로 원기둥의 형태가 반구형태보다 구조적으로 불안정함을 잘 보여주고 있다.

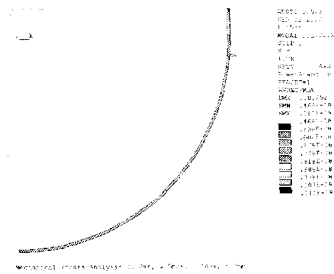


Fig. 6 Mechanical stress analysis

(Beam current ; I=6mA , Coolant input velocity ; V=5m/s, Beam diameter ; D=20cm, Beam window thickness ; t=2mm)

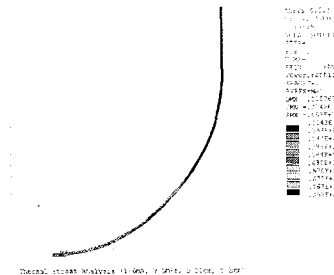


Fig. 7 Thermal stress analysis

(Beam current ; I=6mA , Coolant input velocity ; V=5m/s, Beam diameter ; D=20cm, Beam window thickness ; t=2mm)

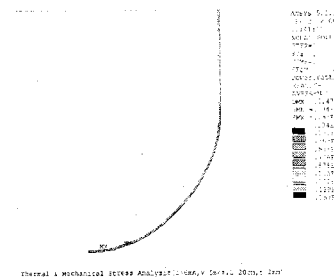


Fig. 8 Thermal & mechanical stress analysis
(Beam current ; I=6mA , Coolant input velocity ; V=5m/s, Beam diameter ; D=20cm, Beam window thickness ; t=2mm)

Fig. 7에서 Thermal stress는 빔창의 두께를 중심으로 대칭성을 보이고 있는데 이는 열팽창에 의해 빔창의 안쪽은 압축력이 작용하고 빔창의 바깥쪽은 인장력이 작용함을 나타내고 있다.

4. 결 론

HYPER의 냉각재와 가속기의 표적물질로서 액체 Pb/Bi를 가속기 빔창재료로 9Cr-2WVTa의 물성값들을 적용하여 FLUENT는 열수력 문제에, ANSYS는 최종 Stress계산에 이용하여 다양한 조건에서 계산하였다.

2개의 상용코드를 이용하여 열·유체 문제와 구조 문제로의 접근을 하였다.

FLUENT에서 계산된 결과를 토대로 ANSYS를 이용하여 구조적인 문제를 계산하였으며 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 액체 Pb/Bi 표적의 온도분포와 속도, 압력분포를 계산하여 가장 최적의 표적구조를 제시할 수 있었다.
2. 가속기 빔창의 여러 가지 변수에 따른 냉각 특성과 가능성을 제시하였으며 빔창의 온도상승에 따른 다양한 냉각방법과 여러 조건들에 따른 냉각특성을 제시하였다.
3. 기존에 검증되어져 사용되고있는 상용 FVM Code인 FLUENT와 FEM Code인 ANSYS를 이용하여 열·유체 및 구조문제를 계산하였다.
4. 여러 가지 변수들중 효과적인 HYPER 시스템의 냉각방법은 빔지름은 크게하고 빔전류와 Pb/Bi의 입구속도는 낮도록 설계함이 빔창이 견딜 수 있는 조건의 범위를 확대할 수 있다.
5. 빔창의 두께가 두꺼워 질수록 빔창의 Thermal stress는 증가하고 Mechanical stress는 감소하였다. 그 중 Thermal stress에 의한 영향이 지배적이므로 가능한 빔창의 두께를 얇게 설계해야 한다는 결론을 도출했다.
6. 현재 진행조건으로, 빔창과 Pb/Bi가 최적으로 사용될 수 있는 최대 온도조건인 700℃와 최대 Stress 200MPa이하의 범위 내에서 최적의 조건은 빔지름 20cm, 빔전류 6mA, 빔창두께 2mm, Pb/Bi 입구속도 2m/s 이다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. National Research Council, 1996, "Nuclear Waste";Technologies for Separations and Transmutation, National Academy Press.
2. F. Venneri, 1997, "The Los Alamos Acceleration Driven Transmutation of Nuclear Waste (ATW)", IAEA-TECDOC-985, pp 154-178.
3. OECD/NEA, 1984, "Draft of Expert Group Report for Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation System Studies", NEA/PTS/DOC.
4. Carlo Rubbia, 1997, "CERN Concept of ADS. CIEMAT", IAEA Technical Committee Meeting.
5. 한국원자력산업회의, 1997, "원자력연감".
6. 박원석외 4인, 1995, "장수명 핵종 핵변환 기술개발", KAERI/RR-1638/95.
7. Won S. Park, et al, 2000, "HYPER(Hybrid Power Extraction Reactor): A system for clean nuclear energy. Nuclear Engineering and Design 2000", 155-165.
8. Moon-Sung Cho, et al, 2000, "Static strength analysis of CANDU-6 reactor fuel bundle", Nuclear Engineering and Design, 407-419.
9. S. Matsuura, 1999, "Future Perspective of Nuclear Energy in Japan and the OMEGA Program", Nuclear Physics A654, 417c-435c.
10. Wacław Gudowski, 1999, "Acceleration-driven Transmutation Projects. The Importance of Nuclear Physics Research for Waste Transmutation", Nuclear Physics A654, 435c-457c.
11. R. L. Klueh, 2000, "Effect of rhenium and osmium on Mechanical properties of a 9Cr-2W-0.25V-0.07Ta -0.1C Steel", Journal of Nuclear Materials 279, 91-99.