

액체금속 표적 시스템의 열적, 구조적 건전성 평가 및 설계

이용석 · 정창현

서울대학교 원자핵공학과

Thermal-Hydraulic, Structural Analysis and Design of Liquid Metal Target System

YongSuk Lee and ChangHyun Chung

Dept. of Nuclear Engineering, Seoul National University

요 약

사용 후 핵연료의 고독성 장수명 핵종을 저독성 단수명 핵종으로 변환시키기 위한 미임계 핵변환로 연구가 진행중이다. 본 논문에서는 이러한 미임계 핵변환로에서 사용될 표적 시스템을 설계하기 위하여 표적시스템에 대한 열적, 구조적 분석을 수행하였다. 표적시스템의 열수력 분석에서는 diffuse plate를 삽입함으로써 빔창의 냉각효과를 증대시킬 수 있었다. 또한, 주요 인자인 빔창두께, 빔출력, 냉각재 유량 변화에 따른 빔창의 열적, 구조적 건전성 분석을 수행하여 표적시스템의 설계치를 설정하였다. 본 설계조건 하에서 빔창의 최대 온도 및 응력은 허용가능한 범위에 있음을 확인하였다.

Abstract — A research for transmutation reactor is in progress to transmute high radioactive isotopes into low radioactive ones. In this study, thermal-hydraulic and structural analysis was performed to design liquid metal target system that would be used in subcritical transmutation reactor. Diffuse plate installation was considered to enhance cooling of window. And thermal-structural analysis of window was performed varying window thickness, beam power, and coolant flow rate to determine target system design values. It is ensured that maximum window temperature and stress would be acceptable in the design condition.

1. 서 론

사용 후 핵연료의 장수명 핵종을 단수명 핵종으로 변환시키기 위한 미임계 핵변환로 연구가 진행중이다. 미임계 핵변환로에서는 중성자 생성을 위하여 표적시스템이 사용된다. 미임계 핵변환로에 대한 개념도는 그림 1의 왼쪽과 같다. 고 에너지의 양성자 빔이 빔창 및 표적과 반응하며, 이에 의해 높은 열이 생성되고 빔창의 온도는 상승하게 된다. 따라서, 표적 시스템의 경우 중요한 문제 중 하나는 높은 열과 고방사화 조건 하에 있는 빔창의 건전성이다. 이러한 표적과 빔창에 관한 연구는 국내에서 아직 초기단계이므로 구체적인 구조 및 설계치가 확립되지 않은 상태이다.

따라서 본 논문에서는 개념설계 단계로 상용 CFD 코드인 FLUENTTM를 사용해 표적 시스템에 대한 열수력 분석을 수행하여 냉각측면에서 효과적인 표적 시스템을

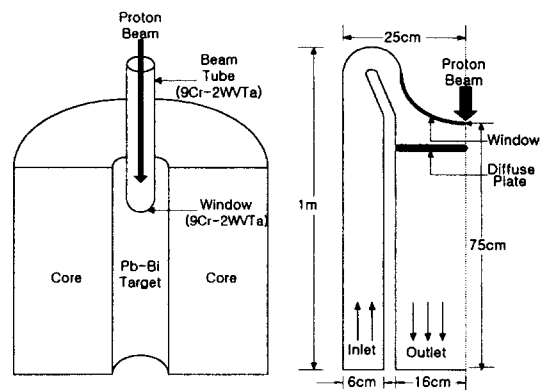


그림 1. 미임계 핵변환로와 표적시스템 개념도.

설계하였으며, ANSYS 코드TM를 사용하여 열-구조적 측면에서 빔창의 건전성을 분석하였다.

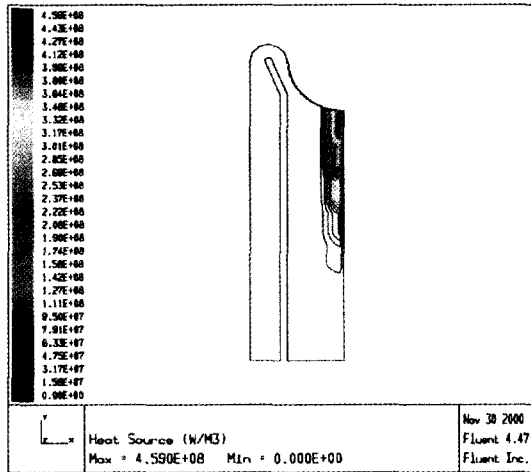


그림 2. 표적시스템 발열량 분포.

2. 액체 금속 표적의 열수력 분석 및 설계

우선, 표적 시스템의 구조를 그림 1의 오른쪽과 같이 축대칭구조로 설계하였다. 표적 시스템에서 사용되는 냉각재로는 액체 납-비스무스(Pb-Bi)를 사용하였으며, 빔창 물질로 ferrite martensite 계열의 9Cr-2WVTa를 사용하였다. 난류모델로는 일반적인 k-ε 모델이 사용되었다.

양성자 빔은 기본적으로 지름 10 cm로서 다음과 같은 분포를 가지고, 위에서 아래로 입사된다고 가정하였다.

$$\phi(p/cm^2 \cdot s \cdot mA) = \frac{1.6 \times 10^{14}}{5^2} (5^2 - r^2)$$

이러한 분포의 양성자 빔과 표적 및 빔창의 반응으로 인해 그림 2와 같이 열이 생성된다. 이러한 열발생량 자료는 참고문헌^{[3])}의 자료를 사용하였다. 기본적으로 빔출력은 1 GeV, 2 mA, 그리고 Pb-Bi의 유량은 0.1 m³/s로 가정하였다.

2-1. 유로 방향에 따른 영향

우선, 유로 방향에 따른 냉각 효과를 분석하였다. 바깥쪽 환형영역을 냉각재 입구로 하고 안쪽 원형영역을 출구로 하는 하부방향 유동(downward flow)과, 이와 반대방향인 상부방향 유동(upward flow)의 영향을 비교 분석하였다.

하부방향 유동과 상부방향 유동에 대하여 빔창에서의 축방향거리에 따른 냉각재 온도 및 속도 분포 계산결과를 그림 3에 나타내었다. 하부방향 유동의 경우 냉각재의 온도가 빔창 주변에서 급격히 변화하지만, 상부방향 유동의 경우는 비교적 완만하게 변화한다. 또한, 최고 온

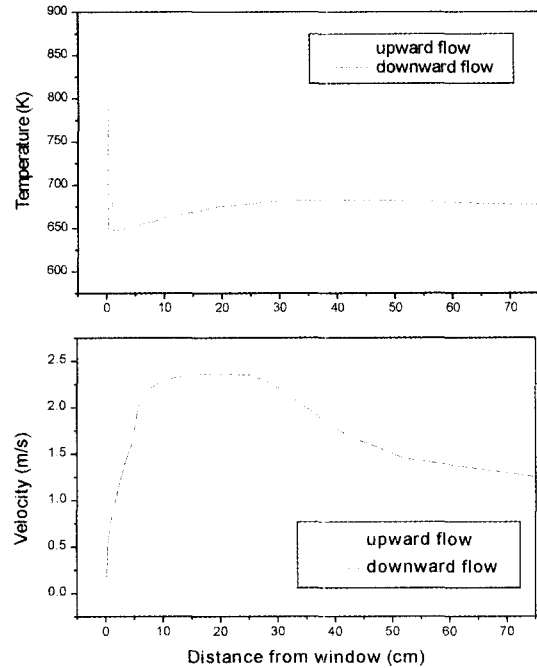


그림 3. 빔창에서의 축방향 거리에 따른 온도 및 속도 분포.

도는 하부방향 유동의 경우가 더 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째로, 상부방향 유동의 경우 빔창을 냉각시키기 전에 양성자 빔과의 반응에 의하여 냉각재의 평균온도가 미리 올라가지만, 하부방향 유동에서는 빔창을 냉각시키기 전에는 냉각재의 평균온도가 높아지지 않는다. 두번째로, 하부방향 유동에서 운동량 및 에너지의 교환이 더 활발하게 일어나기 때문이다. 이는 그림 3에서 보듯이 상부방향 유동의 경우 빔창 주변을 제외하고는 냉각재의 속도가 일정한 반면, 하부방향 유동의 경우 중간 영역에서 속도의 변화가 큰 것을 보면 알 수 있다.

따라서 하부방향 유동이 상부방향 유동보다 냉각측면에서 효율적인 것으로 판단되어, 이후의 분석은 하부방향 유동에 대하여 수행되었다.

2-2. Diffuse plate 설치

표적 냉각재의 속도 계산에서 빔창 아래에서의 유동 정체현상이 심하게 나타났다. 표적 시스템에서 최고 온도가 나타나는 부위는 빔창 중앙부로서, 유동 정체현상이 나타나는 부분과 일치한다. 따라서 빔창 아래에서의 유동 정체현상을 완화시켜 최고 온도를 낮추기 위해 diffuse plate를 설치하는 것을 고려해보았다. Diffuse plate는 중앙에서부터 반경 5 cm, 10 cm, 16 cm로 나뉘

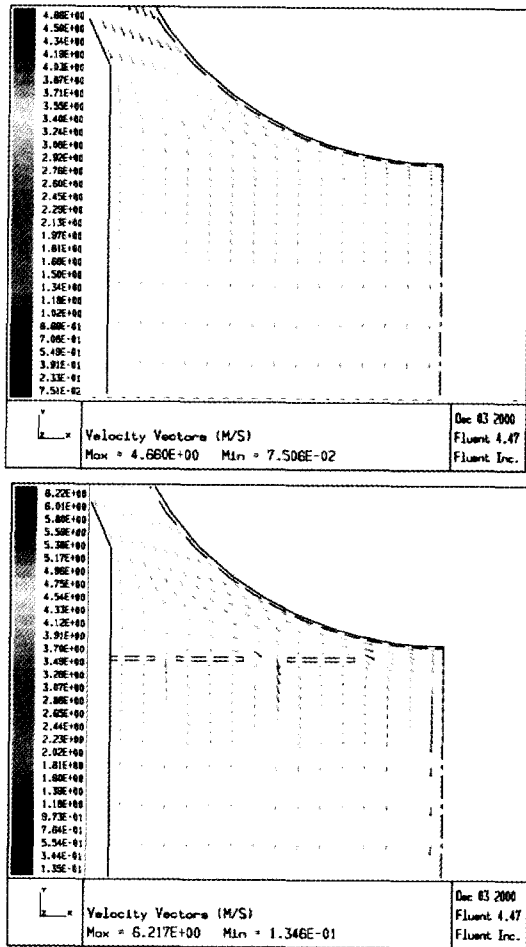


그림 4. Diffuse plate 설치 유무에 따른 속도 분포 비교.

어 우선 각 영역의 porosity를 0.64, 0.42, 0.2로 두어 빔창 중앙부로의 냉각재 유량을 늘이도록 하였다. 그림 4와 같이 diffuse plate를 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 빔창 외부에서의 속도가 높게 나타났다.

표 1. Diffuse plate와 빔창의 거리에 따른 최고 온도 계산 결과.

Distance between window and diffuse plate	60 mm	30 mm	15 mm	8 mm
Maximum window temperature	762 K	719 K	689 K	668 K
Maximum coolant temperature	717 K	679 K	663 K	642 K

2-3. Diffuse plate와 빔창의 거리 영향

Diffuse plate와 빔창의 거리를 변화시키면서 빔창의 최고 온도를 계산해보았다. Diffuse plate와 빔창의 거리를 60 mm, 30 mm, 15 mm, 8 mm로 4가지 case에 대하여 계산을 수행해보았다. 예상대로 diffuse plate와 빔창의 거리가 가장 가까운 8 mm의 경우 최고온도가 가장 낮게 나왔으므로 이를 표적의 기본 설계치로 사용하였다.

3. 빔창의 열적·구조적 분석

표적 시스템에서 최고 온도는 빔창에서 나타난다. 또한 온도증가와 빔창에 가해지는 정적 압력에 의해 빔창에 응력이 생성될 수 있다. 따라서 여러 설계 조건에서 빔창의 열적, 구조적 건전성을 예비적으로 알아보는 것이 필요하다.

설계 조건으로 빔출력, 냉각재 유량, 빔창 두께를 변화시키면서 ANSYS로 온도 및 응력 계산을 수행하였다. 그림 5에 빔창의 온도 분포를 축으로부터 각도 거리에 따라 나타내었다. “Internal”은 두께방향으로 빔창의 윗부분을 나타내고 “external”은 아랫부분(빔창과 냉각재가 접하는 부분)을 나타내며 “mid”는 그 사이의 부분을 나타낸다. 이 그림에서 빔창의 두께 방향으로 큰 온도구배

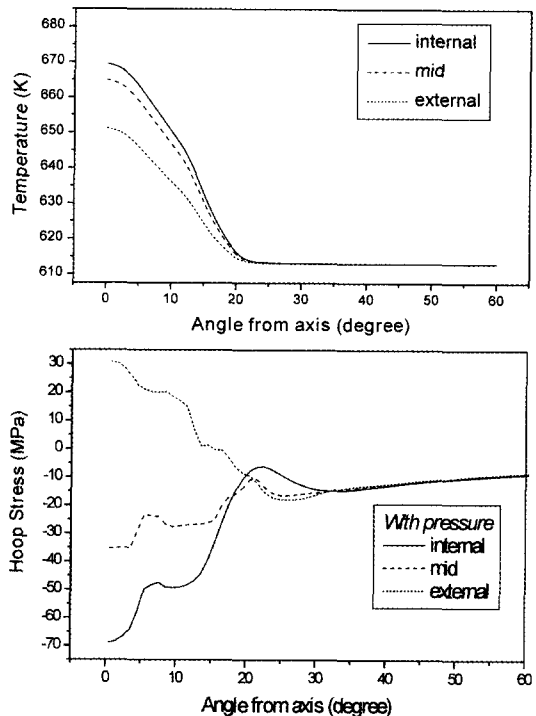


그림 5. 빔창의 온도 및 둘레방향 응력분포.

가 생기는 것을 알 수 있으며, 이에 의해 빔창에서 굽힘응력(bending stress)이 작용하는 것을 볼 수 있다. 이때 냉각재에 의해 빔창에 가해지는 정적압력은 보수적으로 3×10^6 Pa로 두고 계산을 하였다.

3-1. 빔창 두께의 영향

빔창의 두께를 변화시키면서 빔창 온도 및 응력 계산을 수행하였다. 이때 빔출력은 2 mA, 냉각재 유량은 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 두었다. 빔창의 두께 변화에 따라서 최고 온도 및 두께 방향 온도 구배 모두 증가하였으며, 빔창에 가해지는 응력 역시 증가하였다. 열응력 측면에서는 빔창의 두께가 얇을수록 유리하지만, 정적압력에 의한 응력 측면에서는 빔창의 두께가 두꺼울수록 유리하다. 열응력과 정적압력 모두를 고려했을 때, 빔창의 두께가 0.7 mm 정도일 때 응력이 최소가 되었으나, 이외에도 부식 등의 영향을 고려하여야 하므로 여유도를 고려하여 빔창 두께를 1 mm로 설정하였다.

3-2. 빔출력의 영향

빔출력을 변화시키면서 빔창의 온도 및 응력 계산을 수행하였다. 이때 빔창 두께 1 mm, 냉각재 유량은 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 두었다. 빔창이 KAERI에서 개념설계 중인 미입계

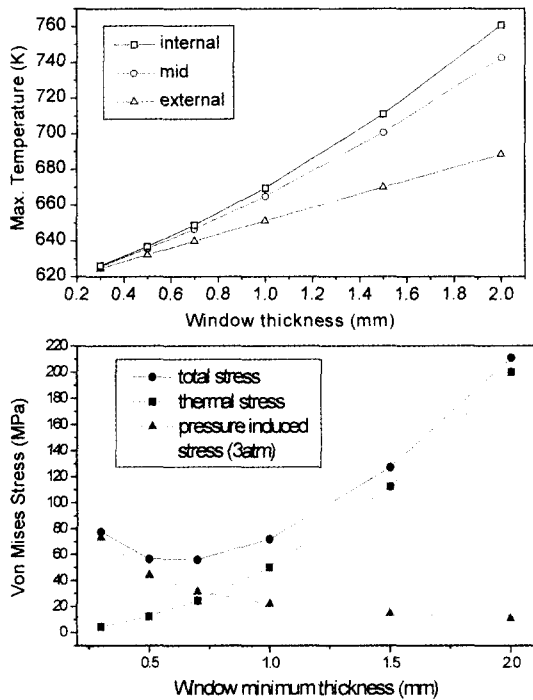


그림 6. 빔창두께 변화에 따른 최대 온도 및 절대응력 계산결과.

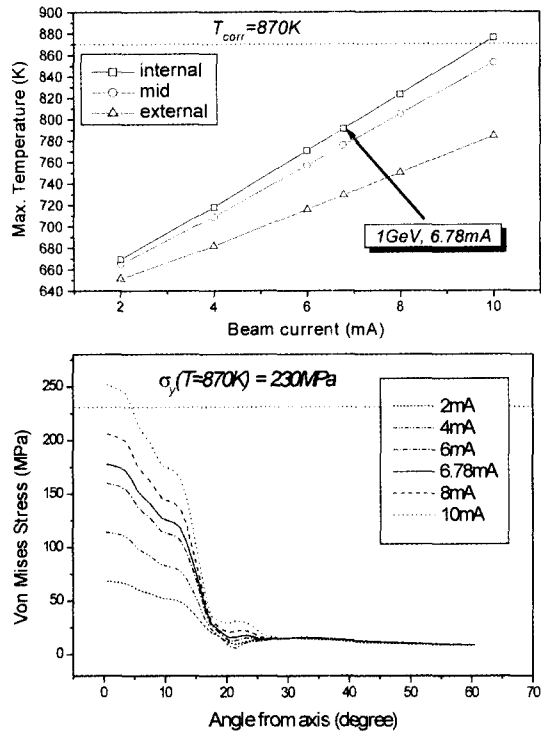


그림 7. 빔출력 변화에 따른 최대 온도 및 절대응력 분포 계산결과.

로 HYPER(Hybrid Power Extraction Reactor)^[3]의 빔출력 설계치 6.78 mA에서 건전성을 유지할 것인지를 알아보았다. 이때, 온도제한치는 870 K로 두었고, 최대절대응력 제한치는 230 MPa로 두었다. 이는 9Cr-2WV-Ta의 온도가 870 K를 넘으면 부식문제가 심각해지고^[4], 9Cr-2WV-Ta의 항복강도가 230 MPa이기 때문이다^[5]. 계산결과 온도와 응력 모두 빔출력에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 빔출력 6.78 mA에서 최대 온도 및 응력이 제한치를 넘지 않는 것을 확인하였다.

3-3. 냉각재 유량의 영향

냉각재 Pb-Bi의 유량을 변화시키면서 빔창의 온도 및 응력 계산을 수행하였다. 빔출력 및 빔창두께는 6.78 mA, 1 mm로 두었다. 냉각재 유량에 따라 빔창의 최대온도는 변화하였으나, 그림 8과 같이 빔창의 절대응력 분포 및 최대응력은 빔창두께 또는 빔출력을 변화시킨 경우와는 달리 거의 일정하였다. 이는 냉각재 유량을 높일수록 빔창의 최대온도는 내려가지만, 최대온도구배는 거의 일정하여 이에 의한 열응력이 거의 변하지 않기 때문이다. 그러나, 냉각재 유량을 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 정도로 낮춘 경우에는 빔창의 최대 온도가 제한치인 870 K를 초과하게 된다.

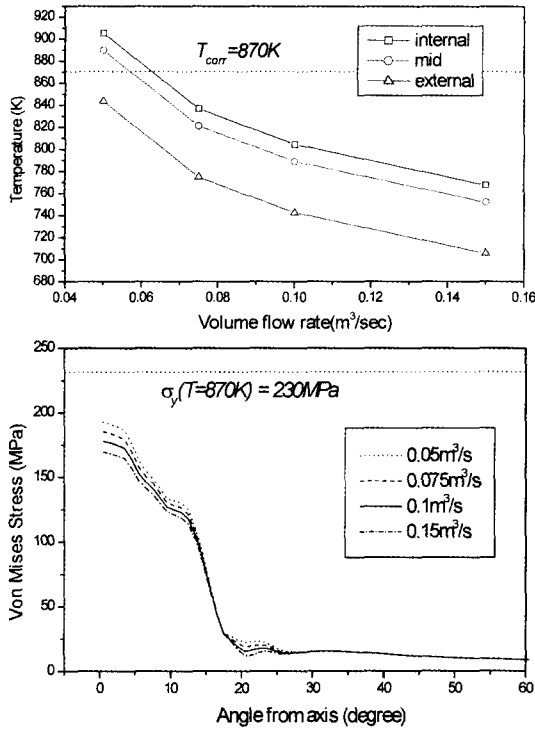


그림 8. 냉각재 유량 변화에 따른 최대 온도 및 절대 응력 분포 계산결과.

여기서는 여유도를 고려하여 냉각재 유량을 0.1 m³/s로 선정하였다.

3.4. 표적 시스템 예비 설계

위와 같은 열적, 구조적 분석을 통하여 예비적으로 표적과 빔창의 설계치를 표 2와 같이 설정하였다. 이 조건에서 빔창의 최대 온도 및 절대응력은 허용가능한 범위에 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

액체 금속 표적 및 빔창에 대한 열적, 구조적 분석 및 예비설계를 시도하였다. 표적 설계에서는 빔창을 효과적으로 냉각시키기 위한 방법들을 검토하였으며, 냉각효율을 높이기 위해 diffuse plate를 설치하는 방법을 제안하

표 2. 표적 시스템 예비 설계값.

Parameters	Values
Target material	Pb-Bi
Active target height	1 m
Target diameter	50 cm
Inlet flow rate	0.1 m³/sec
Inlet coolant temperature	613 K
Diffuse plate porosity	Zone 1 0.64
	Zone 2 0.42
	Zone 3 0.20
Distance between diffuse plate and window	8 mm
Window material	9Cr-2WVTa
Window diameter	30 cm
Window minimum thickness	1 mm
Beam profile	Parabolic
Beam diameter	10 cm
Beam power	1 GeV, 6.78 mA
Max. window temperature	804 K
Max. window von-mises stress	178 MPa

였다. 또한 빔창뚜껑, 빔출력, 냉각재 유량과 같은 설계 변수들에 의한 빔창의 온도 및 응력에 대한 분석을 바탕으로 표적 시스템의 설계치를 설정하였으며, 표적 시스템이 핵변환로 운전조건인 빔 출력 6.78 mA에서 운전성을 유지할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. FLUENT 4.32 User's Manual.
2. ANSYS User's Manual for Revision 5.0.W. S. Park et al., "HYPER System Design Study", KAERI/TR-1316/99 (1999).
3. Appleton, B.R., et al., "Compatibility of Materials with Liquid Metal Targets for SNS", Proceedings of the International Workshop on the Technology and Thermal Hydraulics of Heavy Liquid Metals, P. 3-31 (1996).
4. A. Kimura, et al., "Irradiation hardening of reduced activation martensitic steels", Journal of Nuclear Materials, 233-237 (1996) 319-325.