

HYPER 표적시스템의 열수력 및 구조 해석

Thermal and Stress Analysis of HYPER Target System

송태영, 탁남일, 김용희, 박원석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

송민근, 최진호, 주은선

경상대학교
경상남도 진주시 가좌동 900

요 약

경수로 사용후 핵연료에 존재하는 TRU나 FP 등의 장수명핵종을 지층처분 했을때 독성이 안전한 수준으로 도달하기 위해서는 수백만년의 시간이 걸리는 것으로 알려져 있는데 그러한 장수명핵종을 소멸처리한 후에 지층처분하면 관리기간을 수백년으로 단축할 수 있다. 장수명핵종 소멸처리의 한 방법으로 한국원자력연구소에서는 가속기와 고속로를 결합한 개념인 가속기구동 미임계로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)를 연구해 왔다. 가속기구동 미임계로는 미임계상태에서의 운전을 위해서 외부의 중성자원이 필요하고 HYPER는 1GeV 양성자 빔을 미임계내의 Pb-Bi 표적에 조사해서 생성되는 핵파쇄 중성자를 이용하는 시스템이다. 양성자 빔이 Pb-Bi 표적에 조사될 때 중성자를 생성하는 외에 다량의 열을 Pb-Bi 및 Pb-Bi와 가속진공을 분리시켜주는 빔창에 축적하므로 효율적인 냉각이 필요하다. 본 논문에서는 HYPER 표적시스템의 열수력 계산을 FLUENT 코드를 이용해서 수행하였으며 이러한 계산을 통해서 얻은 결과를 활용하여 빔창의 열적 및 기계적 스트레스 계산을 ANSYS 코드를 이용하여 수행하였다.

Abstract

It takes a few million years to reduce the toxicity of long-lived TRU and FP of PWR spent fuel to the safe level. If those long-lived TRU and FP are transmuted before deposition, the monitoring time can be reduced to a few hundred years. Korea Atomic Energy Research Institute has developed a transmutation system HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) which is a accelerator-driven transmutation system. HYPER is a subcritical reactor which needs an external neutron source. 1GeV proton beam is irradiated to 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.

1. 서론

사용후 핵연료에 존재하는 장수명핵종을 단순히 지층처분시에 독성이 안전한 수준에 도달하는 데는 수백만년이 걸리므로 지층처분전에 소멸처리를 고려하게 되었고 그 중 한 방법으로 가속기와 원자로를 결합한 가속기구동 미입계로에 대한 연구가 전 세계적으로 수행되어 왔다. 한국원자력연구소에서도 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)라는 미입계로의 설계연구를 수행해 왔으며 현재 기본적인 설계가 이루어진 상태이다[1].

그림 1에 HYPER의 개략도가 나타나 있는데 HYPER는 경수로의 사용후 핵연료에서 TRU와 Tc-99, I-129를 소멸처리하도록 설계되어 있으며, 출력 1000MW_{th}, $k_{eff}=0.97$ 의 값을 갖는다. HYPER는 고속로 개념으로 Pb-Bi를 냉각재로 사용하는 loop type 원자로이며 Pb-Bi는 냉각재로 사용되는 동시에 양성자 빔으로부터 핵파쇄 중성자를 생성하는 표적으로도 사용된다. 양성자 빔 에너지는 1GeV이고 원자로 상단에서 빔이 가속되어 Pb-Bi로부터 진공을 유지시켜주는 빔창을 통과해서 Pb-Bi에 조사되게 된다. 이때 핵파쇄 반응을 통해서 양성자 1개당 대략 30개 정도의 중성자가 생성되고 이러한 중성자가 노심에서 이용되게 된다.

핵파쇄 반응시에 양성자 빔 에너지의 일부는 빔창과 Pb-Bi에 열로서 축적되게 되므로 표적시스템의 효율적인 냉각 및 빔창구조의 안정성을 유지하기 위한 설계가 HYPER 연구에 있어서 중요한 사안중의 하나이다. 본 논문에서는 먼저 HYPER 시스템에서 필요로 하는 빔 전류를 계산하고 결정된 빔 전류에 따라 축적되는 열을 표적 냉각시스템이 수용할 수 있는지의 여부를 분석하였다.

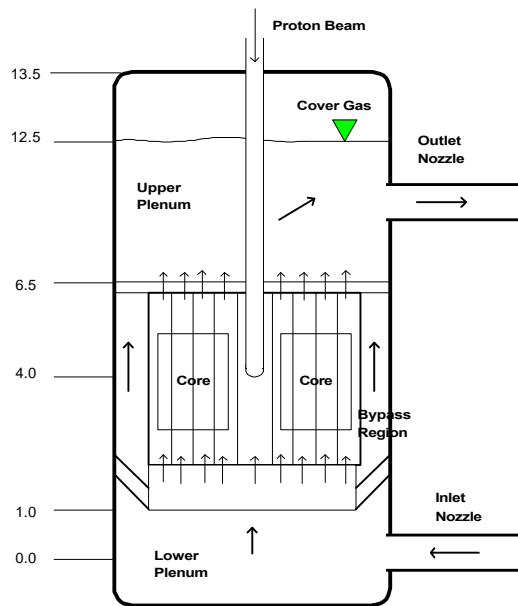


그림 1. 가속기구동 미입계로 HYPER 개략도

2. 표적 설계

그림 2는 표적 설계 개략도이다. 원자로 중심에 지름 50cm의 표적 채널이 있고 하단에서 Pb-Bi가 상승하면서 양성자 빔을 조사받는 구조를 가지고 있다. Pb-Bi의 초기속도는 1.5m/s, 초기온도는 320°C로 설정되었는데 이는 Pb-Bi가 냉각재로도 사용되므로 냉각재의 열수력조건과 관련되어 결정된 것이다.

빔창은 양성자와 중성자의 방사선 환경에서 손상을 덜 받는 9Cr-2WVTa로 선정하였고 두께는

2mm로 하였다. 빔 튜브는 실린더 형태이고 빔 튜브 하단에 반구형 빔창이 연결되는 구조로 하였는데 이는 이러한 구조가 스트레스 측면에서 안정적이기 때문이다.

빔은 원형 빔을 가정하였는데 빔 전류밀도 분포는 parabolic 분포를 갖는 것으로 하였다. 또한 빔창의 지름과 빔 지름의 차이는 항상 5cm를 유지하는 것으로 설정하였는데 이는 빔이 빔 튜브에 조사되지 않는 안전거리를 가지면서 빔 전류밀도를 최소화할 수 있는 거리로 5cm가 적합하기 때문이다.

이러한 설정하에서 최종적으로 결정되어야 할 사항은 빔창의 노심내에서의 수직 방향의 위치와 빔의 지름이다. 빔창의 수직 방향의 위치는 노심에서 핵파쇄 중성자를 가장 효율적으로 이용할 수 있는 값이 최적이지만, 최적의 빔 지름 값은 노심에서의 중성자 이용의 효율성과 표적의 열수력 및 구조상의 안정성을 동시에 고려하여 결정하여야 한다.

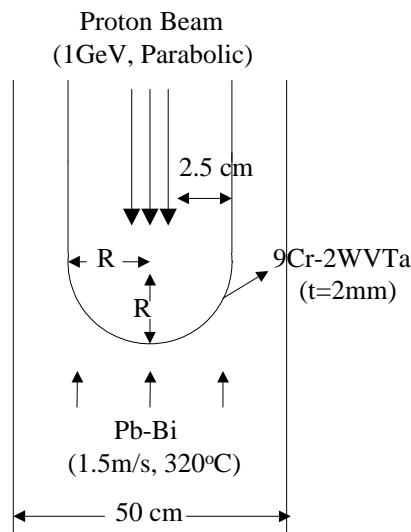


그림 2. HYPER 표적 설계 개략도

3. 표적설계와 중성자 이용 효율성

앞서 논의한 바와 같이 빔창의 수직 방향의 최적위치는 중성자 이용의 효율성에 의해서 결정될 수 있는데 빔창의 수직 방향 위치 변화에 대한 중성자 이용 효율성을 계산하기 위해서 그림 3에 나타낸 것과 같은 노심 구조를 고려하였다. 이 계산을 위해서 빔 지름은 25cm로 고정했으며 따라서 빔 튜브의 지름은 30cm로 설정되었다.

양성자 빔 조사에 의한 핵파쇄 반응시에 생성되는 중성자의 양, 에너지 및 생성위치분포를 알기 위해서 LAHET[2] 코드를 이용하였으며, 이렇게 계산된 중성자원 정보를 서울대학교에서 개발한 코드인 MCNAP에 넣어서 노심 계산을 수행하였다.

그림 3에 빔창 높이별 중성자 이용 효율성을 나타낸 그래프가 있는데 여기서 중성자원 이용 효율성 S_{eff} 는 빔창이 없어서 빔창 쪽으로 중성자누설이 없을 때 100%가 된다. 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 최적의 빔창 높이는 노심 중앙에서 35-45cm 정도 위쪽에 있을 때이다. 그러나 중성자 이용 효율성 외에 노심 출력의 안정성을 고려하여 그 보다 약간 낮은 25cm를 최적의 빔창 높이로 설정하였다. 이때 HYPER가 필요로 하는 빔 전류는 11.7mA로 계산되었고 이 값은 BOC에서의 필요 전류값이다.

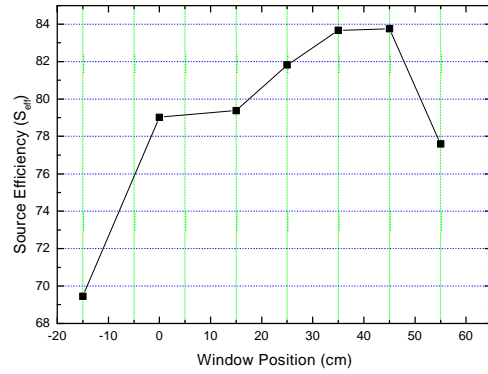
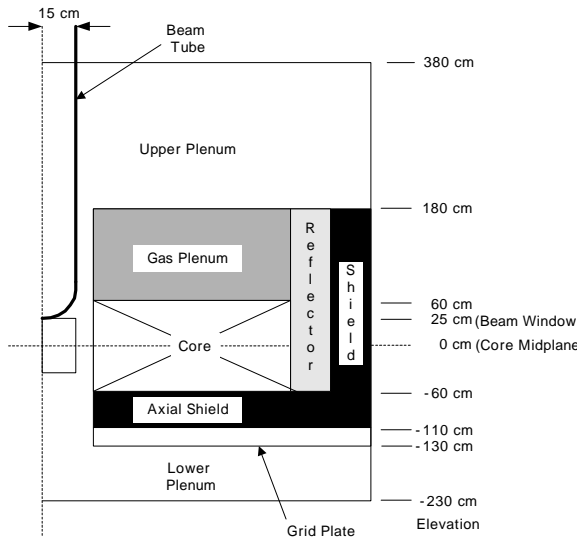


그림 3. 중성자 이용 효율성 계산 노심구조와 빔창 높이 변화에 대한 중성자 이용 효율성 변화

다음 단계로 빔창의 높이를 25cm로 고정시키고 빔 지름을 변화시키면서 중성자 이용 효율성과 그에 따른 필요 전류를 계산하였다. 표 1에 결과가 나타나 있는데 빔 지름은 10, 15, 20, 25cm의 4가지 경우를 계산하였다. 빔 지름이 증가하면서 중성자 이용 효율성이 증가해서 빔 지름이 20cm 일 때 0.97로 최대값을 가졌으며 25cm로 증가하면 0.84로 감소함을 알 수 있다. 이는 빔 지름의 증가가 중성자 이용 측면에서 긍정적인 측면과 부정적인 측면 모두를 가져오기 때문인데 긍정적인 측면으로는 빔 지름이 증가하면 보다 많은 핵파쇄 중성자들이 연료 근처에서 생성된다는 것이고 부정적인 측면으로는 빔 지름 증가시 빔창 지름도 증가해서 보다 많은 중성자들이 누설된다는 것이다. 필요전류도 중성자 이용 효율성이 가장 좋은 빔 지름 20cm 경우에 10.2mA로 25cm 경우의 11.7mA와 비교할 때 1.5mA의 차이가 남을 알 수 있다.

표 1. 빔창 지름 변화에 대한 중성자 이용 효율성 및 필요 전류 변화

Beam Diameter	Tube Diameter	Source Efficiency	Needed Current
10cm	15cm	0.91	10.8mA
15cm	20cm	0.91	10.8mA
20cm	25cm	0.97	10.2mA
25cm	30cm	0.84	11.7mA

4. 표적 열수력 및 구조 해석

각각의 빔 지름에 대한 필요 전류가 계산되었는데 최종적으로 판단해야 할 사항은 표적이 안정적으로 요구되는 전류를 수용할 수 있는가 하는 문제이다. 이를 알아보기 위해서 표적의 열수력 및 스트레스 계산을 수행하였는데 먼저 LAHET 코드를 이용해서 빔 조사시 빔창 및 Pb-Bi에서 발생하는 열을 계산 하였다. 빔 반경 R과 전류 I에 대한 발열량을 표적 반경 r과 깊이 방향의 함수로 표시한 것이 식(1)에 나타나 있다.

$$1.88 \times 10^{10} \times \frac{2I}{\pi R^4} \times (R^2 - r^2) \quad \text{unit: } (W/m^3) \quad (1)$$

I = 전류(mA), R = 빔의 반경(cm), r = center 에서 부터 거리(cm)

식(1)은 빔창 및 깊이가 10cm 이내인 Pb-Bi에서 적용되며 깊이가 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm, 40-50cm인 Pb-Bi의 경우에는 각각 식(1)의 값에 0.59, 0.31, 0.14, 0.07을 곱한 값을 사용하였다. 또한 식(1)의 값은 반경이 R보다 작고 깊이가 50cm보다 작은 경우에만 적용하고 그 이외의 지역에서는 단지 미량의 열이 축적되므로 열발생이 없는 것으로 설정하였다.

LAHET를 이용해서 얻은 열발생량을 사용해서 표적의 온도, 속도, 압력분포를 FLUENT 코드를 이용해서 계산하였고 온도, 압력분포로부터 ANSYS[3]를 사용해서 스트레스를 계산하였다. 표 2와 3에 계산에 사용한 Pb-Bi 및 9Cr-2WVTa의 온도별 물성치를 나열하였는데 9Cr-2WVTa의 경우에는 data를 얻기 어려워서 yield stress와 heat capacity를 제외하고는 9Cr-Mo-V-Nb의 data를 이용하였다. 압력 계산시에는 빔창에 부과되는 정압으로 16기압을 설정했는데 이중에서 8기압은 cover gas에 기인하는 것이고 나머지 8기압은 Pb-Bi에 기인하는 것으로 그림 1로부터 파악할 수 있다.

표 2. 온도별 Pb-Bi material property

density (g/cm ³)	Heat Capacity (Cal/g °C)	Thermal Conductivity (Cal/sec cm °C)	Viscosity (Centi Poises)
10.46 (200°C)	0.035 (144~358°C)	0.022 (160°C)	1.7 (332°C)
10.19 (400°C)		0.023 (200°C)	1.38 (450°C)
9.91 (600°C)		0.024 (240°C)	1.29 (500°C)
9.64 (800°C)		0.026 (300°C)	1.23 (550°C)
9.36 (1000°C)		0.027 (320°C)	1.17 (600°C)

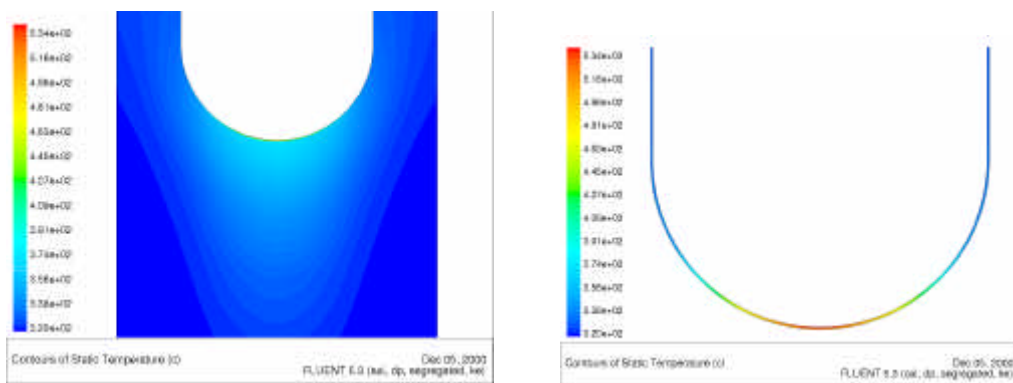
표 3. 계산에 이용한 온도별 9Cr-2WVTa material property

item	unit	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	참고
Young's Modulus	Mpa	218		207	199	190	181	168	9Cr-Mo-V-Nb
Thermal Exp. coeff.	$\times 10^{-6}K^{-1}$	10.4		11.3	11.7	12.0	12.3	12.6	9Cr-Mo-V-Nb
Poisson Ratio		0.29		0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	9Cr-Mo-V-Nb
Density	kg/m ³	7730		7680	7650	7610	7580	7540	9Cr-Mo-V-Nb
Thermal Conductivity	W/m · K	26		28	28	29	30	30	9Cr-Mo-V-Nb
Yield Stress	MPa		650	620	610	600	560	500	9Cr-2WVTa
Heat Capacity	J/kg · K	402		461		528		595	9Cr-Mo

중성자 이용 효율성 계산시와 마찬가지로 빔 지름이 10, 15, 20, 25cm인 4가지 경우를 고려하였고 각각의 경우에 표적이 수용할 수 있는 최대 빔 전류를 계산하였다. 최대 빔 전류 계산을 위해

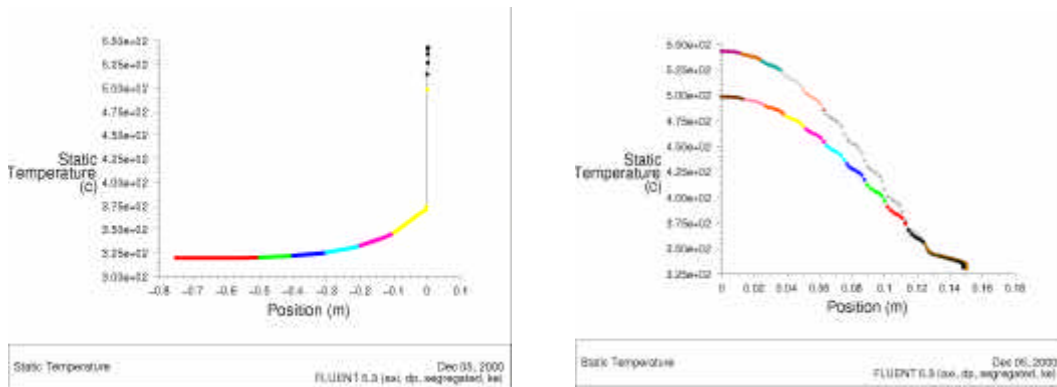
서 표적의 안정성을 보여주는 변수의 종류와 한계값을 설정해야 되는데 본 연구에서는 변수의 종류로서 Pb-Bi 최대온도, 빔창 최대온도, 빔창 최대 스트레스를 선택하였다. 보다 정확한 판단을 위해서 고려되어야 할 사항으로 빔창의 방사선 손상이 있으나 빔창의 방사선 손상과 관련해서 현재 이용 가능한 자료들이 충분치 않으므로 본 연구에서는 이를 배제하였다. 변수의 최대값은 Pb-Bi의 경우에는 부식을 고려하여 500°C를 허용 최대값으로 하였고, 빔창의 최대온도는 600°C로 하였다. 빔창의 최대 허용 스트레스는 yield stress의 1/3 정도인 150MPa로 설정하였다.

빔 지름이 25cm인 경우에 빔 전류를 증가시키면서 온도 및 스트레스의 변화를 분석하였는데 빔 전류가 8.2mA일 때 Pb-Bi의 온도가 최대 허용치인 500°C에 도달함을 알 수 있었고 이때 빔창의 최고 온도는 542°C, 최대 스트레스는 124MPa로 계산되어 최대 허용치에 미달됨을 알 수 있었다. 빔 지름이 다른 경우에도 빔 전류의 최대치를 결정하는 변수는 Pb-Bi의 최대온도였다. 그림 4는 빔 지름이 25cm이고 빔 전류가 8.2mA일때의 표적 온도 분포 계산 결과이고 그림 5는 스트레스 계산 결과이다.



(a) Pb-Bi + 빔창

(b) 빔창



(c) Axial Distribution(빔창 + Pb-Bi)

(d) Radial Distribution(빔창 위 + 아래)

그림 4. 빔 지름이 25cm이고 빔 전류가 8.2mA인 경우의 온도 분포

온도 분포의 경우에 빔창 중앙에서 최대치를 나타냈으며 그림 4(c)에서 볼 수 있는 것처럼 표적 깊이 방향으로 급격한 온도 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 하단에서 상승하는 Pb-Bi가 빔창 밑에서 정체되는 stagnant 현상 때문이며 보다 효율적인 냉각을 위해서는 인위적인 난류 형성 등의 방법으로 stagnant를 해소하여야 함을 알 수 있다.

초기속도가 1.5m/s 였던 Pb-Bi는 빔창을 통과하면서 표적 채널과 빔창의 간격이 좁아져서 최

고 2.7m/s의 속도가 됨을 알 수 있었는데 이는 Pb-Bi의 부식 특성상 높은 수치이므로 이에 대한 고려도 필요하다.

스트레스의 경우에는 mechanical stress는 최대값이 109MPa로 빔 튜브의 실린더 측면에서 나타났고 thermal stress의 경우에는 최대 88MPa로 빔창 중앙에서 존재함을 알 수 있었다.

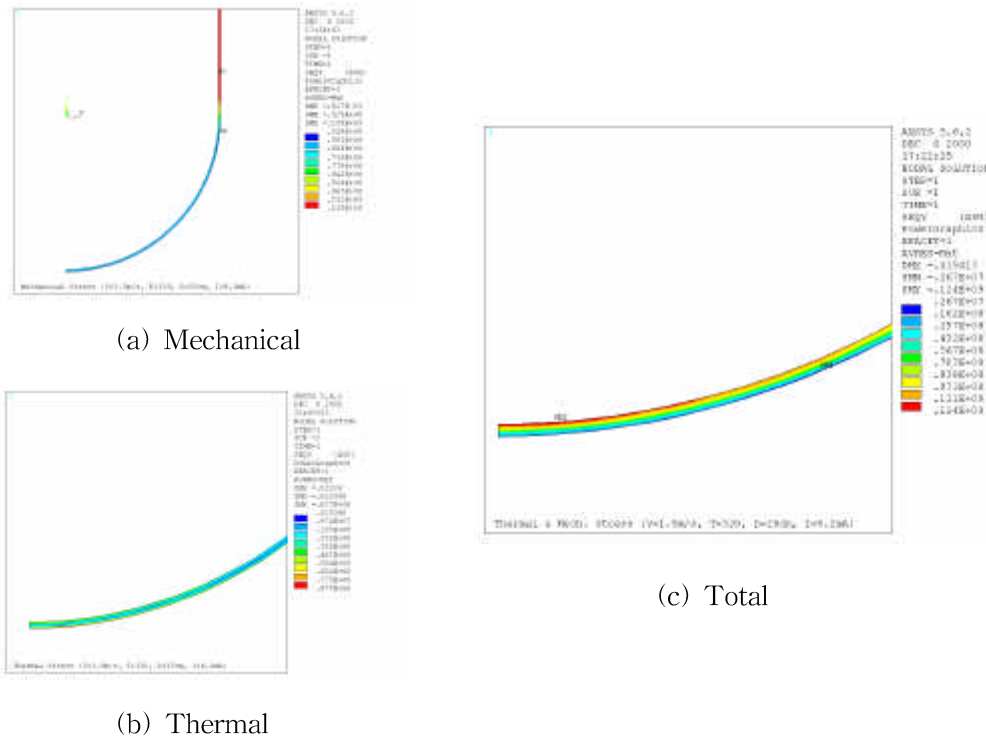


그림 5. 빔 지름이 25cm이고 빔 전류가 8.2mA인 경우의 빔창 스트레스 분포

5. 결론

표 4에 4가지 빔 지름의 경우에 대해서 계산한 결과를 정리하였다. 빔 지름이 20cm일 때 중성자 이용 효율성이 가장 좋아서 빔 전류는 최소인 10.2mA가 요구되지만 이 경우에 표적이 수용할 수 있는 전류는 5.4mA에 불과함을 알 수 있었다. 따라서 시스템의 안정적 운영을 고려하면 중성자 이용 효율성이 떨어지더라도 빔 지름을 증가시켜야 함을 알 수 있다. 빔 지름이 25cm인 경우에 필요전류와 허용전류의 차이는 작아지지만 여전히 필요전류가 허용전류보다 크을 알 수 있고 따라서 보다 효율적인 냉각 방식의 도입이 필요하다.

표 4. 빔 지름별 필요 전류 및 표적 수용 가능 전류

Beam Diameter	Tube Diameter	Needed Current	Max. Current	Max. Window Temperature	Max. Pb-Bi Temperature	Max. Stress
10cm	15cm	10.8mA	1.6mA	546°C	494°C	
15cm	20cm	10.8mA	3.3mA	548°C	500°C	117MPa
20cm	25cm	10.2mA	5.4mA	539°C	495°C	123MPa
25cm	30cm	11.7mA	8.2mA	542°C	500°C	124MPa

현재 고려할 수 있는 표적 냉각 개선 방식은 다음과 같은 것들이 있다.

- 빔 지름 및 빔 튜브 지름 증가
- 빔창 두께 및 형태 변경
- 빔창 하단에 orifice 등의 설치로 Pb-Bi의 turbulent flow 유도
- Beam scanning
- Windowless target

위에서 열거한 방법들 중에서 빔 지름을 증가시키는 방법이나 windowless target 시스템을 도입하는 방법은 전체 HYPER 시스템의 변경이 필요하므로 노심 계산등과 연계한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 박원석 외 4인, "HYPER 시스템 설계 연구", 한국원자력연구소 기술보고서
KAERI/TR-1316/99, 1999
- [2] R. E. Prael et al., "User Guide to LCS ; The LAHET Code System", Los Alamos National
Laboratory, LA-UR-89-3014, 1986
- [3] ANSYS User's Manual for Revision 5.0