

고에너지 대전류 이온빔 표적에서의 열부하 해석 Analysis of Thermal Load on Target due to High Energy and Large Current Ion Beam

정남석, 김인중, 김성진, 최희동
서울대학교, 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

1. Introduction

서울대학교에서 개발 중인 D-D 중성자 발생장치[1,2]의 중성자 발생 표적에 대한 열부하 해석을 수행하였다. 발생장치의 최대 이온빔 에너지와 전류는 120 kV, 50 mA 이고, 중성자 발생 표적은 TiD 이다. Prototype 으로 제작한 중성자 발생 표적 집합체에 대해서 해석을 수행하여 적정 운전 조건과 한계를 제시하였으며 새로운 표적 집합체 구조를 제안하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 해석에는 유체유동해석범용 code 인 CFX 4.2[3]를 사용하였다.

2. Prototype 표적 집합체 열부하 해석

Prototype 으로 제작한 중성자 발생 표적 집합체는 표적함 내부의 진공 달성, 냉각 특성 확인, 고전압 인가 실험 등을 목적으로 설계, 제작되었다[1]. 표적은 0.5 mm 두께의 TiD 를 사용하고, 냉각수가 TiD 표적을 냉각한다. 냉각수는 고전압 인가를 위한 Cu 구조물과 외부 절연물에 의해 형성된 유로를 통해 공급된다. 표적 냉각 계통 전체의 최대 유량은 20 lpm 이고, prototype 표적 집합체를 장착했을 때 표적 위치에서의 유량은 2 lpm 이다.

Reynolds 수의 계산 결과 7361 로 난류에 해당하였다. 냉각수가 끓지 않는 단상 유동을 가정하고, 단상 유동에서의 유동장 예측에 널리 사용되는 모델인 $k-\epsilon$ 모델[4,5]을 사용하여 해석을 수행하였다. 유동장 예측을 위한 경계 조건으로 유로 입구의 냉각수 온도는 10 °C, 유속은 1.18 m/s 로 설정하였다. 난류 운동에너지(k) 및 소산율(ϵ)은 다음과 같이 계산하였다[3].

$$k = 1.5(IU_{in})^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{k^{1.5}}{0.3D_h} \quad (2)$$

여기서 U_{in} 은 입구 유속[m/s], I 는 입구 난류 강도[dimensionless], D_h 는 입구 직경[m]이다. I 는 0.05 로 가정하였다[3]. 유로 출구에서의 경계 조건은 출구에서의 속도와 압력을 모르므로

입구로 들어온 유량이 출구를 통해 모두 빠져나간다는 mass flow 경계를 가정하였다. 가열 벽면에는 열적 경계 조건으로 이온빔에 의한 균일한 열속 조건을 가정하였다. 가열 벽면을 제외한 벽면에서는 단열 조건을 가정하였다. 압력과 엔탈피 계산에는 Algebraic Multi-grid 법을 사용하였으며 수치적 불안정성 해결을 위한 알고리즘으로는 Upwind 차분 방식을 적용하였다. 해석은 계산된 변수들의 값이 정상 상태에 도달할 때까지 수행하였고 수렴 조건은 해석 영역 내의 mass residual 이 10^{-6} 이하가 되도록 하였다.

이온빔 가속 전압 70 kV, 이온빔 전류 1 mA 조건에서의 해석 결과는 그림 1 과 같다. 표적 전면에는 빠른 유속으로 인해 와류가 발생하였다. 표적 위치에서의 냉각수의 최대 온도는 25 °C로 나타났다. 그림 2 에서는 이온빔 출력에 따른 표적 위치에서의 냉각수 최대 온도를 나타내었다. 그림으로부터 이온빔 출력 450 W 인 조건에서 표적의 온도는 100 °C이다.

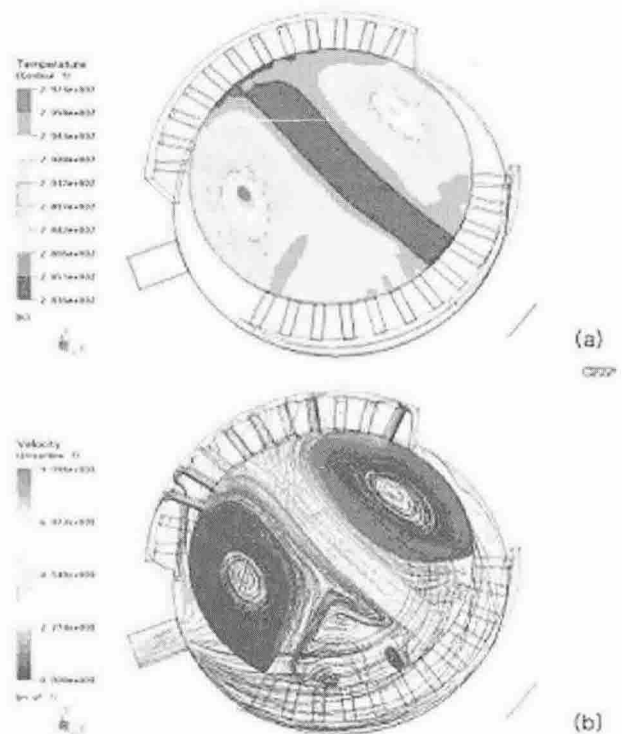


Figure 1. Results of the analysis for the prototype target; (a): temperature distribution, (b): streamline

velocity.

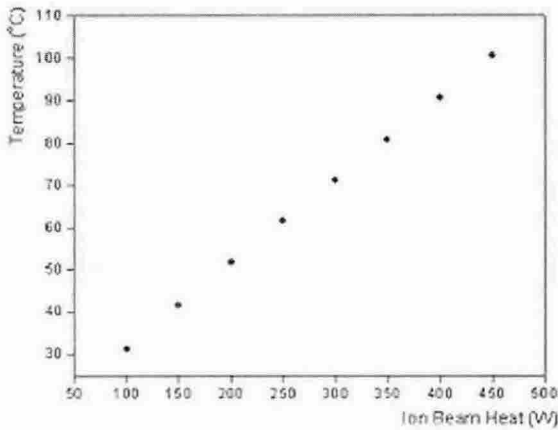


Figure 2. The maximum temperature of the frontal target as a function of ion beam heat.

3. 새로운 표적 집합체 열부하 해석

Prototype 표적 해석 결과로부터 새로운 표적 집합체를 설계하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 새로운 표적 집합체는 prototype 표적 집합체에 비해 구조를 단순화하고 유로를 넓힘으로써 유량을 높일 수 있도록 설계하였다. 새로운 표적 집합체에서 냉각수는 중앙으로 유입되어 표적 전면으로 퍼져 표적 바깥으로 흘러나가는 형태를 갖는다.

새로운 표적 집합체에서의 유량은 냉각 계통 전체의 최대 유량인 20 lpm 을 가정하였다. 이온빔 출력 450 W 에 대한 새로운 표적 집합체에서의 해석 결과를 그림 3 에 나타내었다.

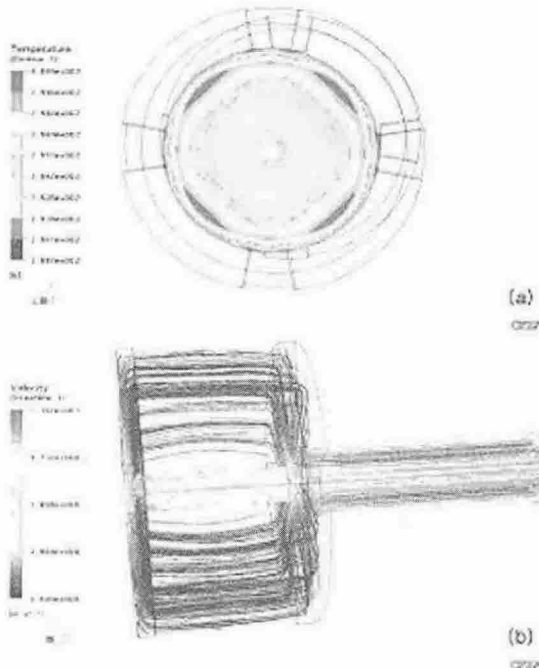


Figure 3. Results of the analysis for the new target:

(a): temperature distribution, (b): streamline velocity.

해석 결과 표적 위치에서 냉각수의 최대 온도는 28 °C로써 prototype 표적 집합체에 비해 크게 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 새로운 표적 집합체에서 냉각수 온도는 표적의 바깥쪽에서 최고가 되었고 이는 유동장의 확장에 의한 유속의 감소 때문이다. 실제 이온빔의 분포는 입력 조건과 달리 균일하지 않고 바깥으로 갈수록 전류밀도가 떨어지므로 온도 상승폭은 해석 결과만큼 높지 않을 것이다. 새로운 표적 집합체의 또 다른 특징은 표적 중심 위치에서의 온도가 주변에 비해 상대적으로 높은 것인데 이는 냉각수가 표적 전면에서 수직으로 부딪히며 발생한 jet impingement 에 의한 것으로 판단된다. 표적 중앙의 유동이 활발하지 않음을 Streamline 을 통해 확인할 수 있다.

4. Conclusion

CFX 4.2 code 를 이용하여 D-D 중성자 발생장치 표적 집합체에 대한 열부하 해석을 수행하였다. 해석 결과 prototype 표적 집합체는 이온빔 출력 70 W 의 조건에서 표적 최고 온도는 25 °C로 나타났고, 보다 높은 450 W 조건에서는 100 °C로 나타났다. 이로부터 prototype 표적 집합체에 대한 이온빔 출력 한계를 450 W 로 결정하였다. Prototype 표적 집합체에 대한 해석 결과를 이용하여 새로운 냉각 방식을 제안하고 이를 바탕으로 새로운 표적 집합체를 설계하였다. 새로운 표적 집합체에 대한 해석 결과는 이온빔 출력 450 W 에서는 28 °C의 결과를 보임으로써 새로운 표적 집합체의 냉각 능력이 향상 되었음을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] 김인중, 최희동, "D-D 중성자 발생장치 개념설계", 2002 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
- [2] 김인중, 최희동, "D-D 중성자 발생장치 중성자 수율 계산", 2003 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
- [3] AEA Technology, User's Manual to CFX Version 4.2, AEA Technology plc, 1998
- [4] 노의근, "난류론", 시그마프레스, pp.172 ~ 174, 2001
- [5] W. Frost, T. H. Moulden, "Handbook of Turbulence", Plenum Press, New York, 1977