2002 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

우회냉각이 없는 MEGAPIE 표적 전산유체해석

CFD Analysis of the MEGAPIE Target without Bypass Injection

탁남일, 조충호, 송태영, 박원석

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

MEGAPIE 과제는 스위스 PSI 에 있는 SINQ 고체 표적 시설을 이용하여 1MW 빔출력을 갖는 Pb-Bi 액체 핵파쇄 표적의 설계, 제작, 운전, 조사후 검사, 해체를 위한 국제공동연구과제이다. 한국원자력연구소는 2001 년 하반기부터 MEGAPIE 과제에 공식적인 파트너로서 활동하기 시작하였다. 본 연구에서는 우회냉각이 없는 MEGAPIE 표적에 대한 전산유체해석을 수행하였다. 우회냉각은 MEGAPIE 표적에 도입될 예정이므로 우회냉각이 없는 해석은 우회냉각펌프 고장을 가정한 해석이라고 할 수 있다. 전산유체해석을 위해서 범용 상용코드인 CFX 4 를 사용하였다. 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축과의 방향을 두가지로 나누어 해석을 수행하였다. 첫 번째 경우는 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축이 서로 평행한 경우이며 두 번째 경우는 두 주축이 서로 수직인 경우이다. CFX 해석 결과 두 가지 경우에 대해서 빔창 최대온도가 551.8 ℃ 와 485.5 ℃ 로 나타났다. 따라서 양성자 빔의 주축을 가이드 튜브 절단면 주축과 수직이 되도록 설계하는 것이 빔창 및 표적 냉각에 유리한 것으로 나타났다. 또한 빔창 물질인 T-91 의 용융점을 고려할 때 두 가지 경우에 대해 모두 우회냉각펌프가 고장난다고 하더라도 빔창파손과 같은 사고가 즉시 일어나지는 않을 것으로 판단된다.

Abstract

The MEGAPIE project is an international project to design, build, operate, examine and decommission a liquid Pb-Bi spallation target of 1 MW beam power making use of the existing SINQ facilities at PSI. KAERI started to be involved in the MEGAPIE project as an official partner since the end of 2001. In the present work, computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed for the MEGAPIE target without bypass injection. Since the MEGAPIE target will adopt a bypass injection, the present analysis is for the case of the failure of bypass injection pump. The CFX 4 code was used for the analysis. Two cases were considered depending on the

orientation of the beam and the titled surface of the guide tube. The first (Case A) is the case when the major axis of the proton beam is parallel to the major axis of the tilted surface of the guide tube. And the second (Case B) is the case when two axes are perpendicular each other. The CFX calculations show that the maximum window temperatures are 551.8 ℃ and 485.5 ℃ for the two cases, respectively. Therefore, it is concluded that Case B is better than Case A in terms of the window cooling and the window failure is unlikely to occur in case of the failure of the bypass injection pump.

1. 개 요

세계적으로 가속기구동 미임계 핵변환로(accelerator-driven transmutation system)에 대한 관심이 커져만 가고 있다 [1-2]. 가속기 구동 미임계 핵변환로는 양성자 가속기, 핵파쇄 표적, 미임계 원자로로 구성된다. 그 중에서 핵파쇄 표적은 고에너지 양성자를 이용하여 중성자를 생성하는 장치이다. 핵파쇄 표적의 물질로서 액체금속 Pb-Bi 가 세계적으로 각광을 받고 있다. 그러나 지금까지의 Pb-Bi 표적에 대한 연구는 소프트웨어적인 설계나 해석에만 그쳐왔다. 따라서 Pb-Bi 표적에 대한 실증실험이 유럽을 중심으로 2000 년부터 시작되었는데 이것이 바로 MEGAPIE (MEGAwatt PIlot Experiment) 과제이다 [3,4]. MEGAPIE 과제는 스위스 PSI 에 있는 고체 표적 SINQ 설비를 Pb-Bi 액체표적로 교체하고 빔출력도 1MW 로 약간 증가시키는 과제로서 1 MW 급 Pb-Bi 액체표적의 설계, 제작, 운전, 조사후 검사, 해체를 목표로 2006 년까지 수행될 예정이다. MEGAPIE 과제에는 초기부터 참여한 유럽의 6 개 연구기관 (스위스 PSI, 프랑스 CEA, CNRS, 독일 FZK, 이탈리아 ENEA, 벨기에 SCK-CEN) 에다가, 2001 년 하반기에 한국원자력연구소를 비롯하여 일본의 JAERI 와 미국 DOE 가 합류함으로써 총 9 개 기관이 공식적인 연구 참여를 하고 있다. 한국원자력연구소는 Pb-Bi 열수력 및 부식, 빔창 방사선 손상 등의 분야에 적극적으로 참여함으로써 Pb-Bi 및 핵파쇄 실증 기술 확보를 꾀하고 있다.

본 연구에서는 우회냉각이 없는 MEGAPIE 표적에 대한 전산유체해석을 수행하였다. 우회냉각이 MEGAPIE 표적에 도입될 예정이므로 우회냉각이 없는 해석은 우회냉각펌프가 고장난 경우라고 할 수 있다. 전산유체해석을 위해서 상용코드 CFX 4 [5]를 사용하였다.

2. MEGAPIE 표적

MEGAPIE 표적의 개괄적인 모습을 그림 1 에 나타내었다. MEGAPIE 표적은 스위스 PSI 에 존재하는 고체표적 SINQ 설비를 개량하는 것이기 때문에 대부분의 SINQ 설비 조건을 그대로 따르고 있다. 즉 양성자 빔은 표적 하부에서 주입되며 표적 취급 장치가 표적 상부에 위치한다. 표적 전체 길이는 5.39 m 이며 Pb-Bi 를 채우기 전 무게가 1.5 톤 정도이다. 전체 Pb-Bi 부피는 82 리터이다. 표적 물질 Pb-Bi 는 전자기 펌프에 의해서 순환되며 표적 하부에서 발생된 열은 표적 상부에 위치한 열교환기를 통하여 제거된다. 빔창의 원활한 냉각을 위해서 우회냉각이 도입될 예정이며 우회 냉각 유동은 우회냉각용 전자기 펌프에 의해 순환된다.

본 연구에서 고려한 표적 형상을 그림 2 에 나타내었다. Pb-Bi 표적은 실린더 환형부에서 주입되어 빔창 부근에서 가열되고 가이드 튜브 안쪽을 통해 빠져나간다. 가이드 튜브 중앙에는 히터와 계측장치가 부착될 중앙계측봉(central instrumentation rod)이 주입될 예정이다. 봉에 부착된 히터는 혹시 있을지도 모를 Pb-Bi 의 응고를 막기 위함이다. 또한 이것은 폐기물이 될 Pb-Bi 의 부피를 줄이기 위한 목적도 있다. 빔창 및 빔창 튜브는 T-91 steel 이 가이드 튜브는 ANSI-316 steel 이 이용될 예정이다.

그림 1. MEGAPIE 표적

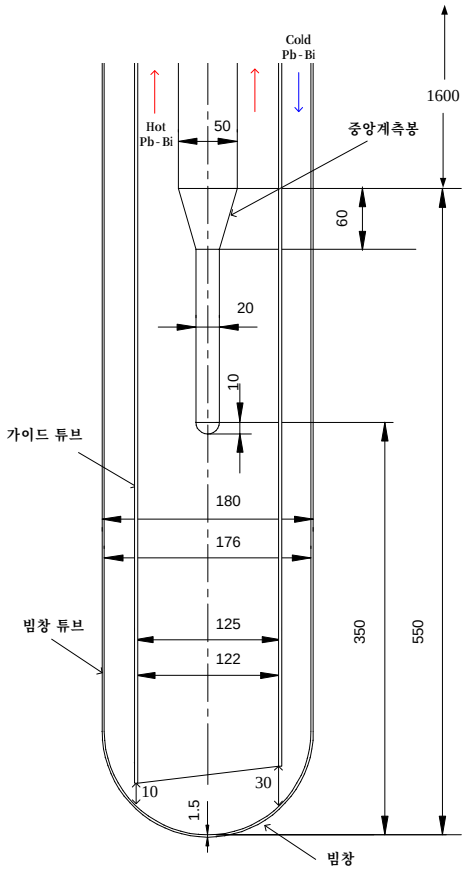


그림 2. 본 연구에서 고려한 MEGAPIE 표적 형상 (길이:mm)

3. 전산해석 모델

3.1 계산영역 및 격자생성

본 연구에서는 그림 2 에 나타내었듯이 그림 2 의 형상을 빔창 안쪽으로부터 높이 2150mm 부분까지 연장시켜 계산하였다. 본 연구에서 고려한 표적은 가이드 튜브 아랫쪽이 약 9 도 가량의 각도로 절단된 표적으로서 우회 냉각 유로가 없는 경우이다. 그림 2 의 표적 형상은 중앙 평면 (y=0)를 중심으로 대칭이므로 전산 해석은 실제 모양의 절반 부분만 계산하였다.

수치해석을 위해 생성한 전체 격자수는 약 370000 개이며 빔창중앙 부근에서 Pb-Bi 셀 중

심과 빔창 벽면과의 최소거리는 약 0.5 mm 정도이다.

3.2 핵파쇄 열생성

MEGAPIE 표적에 사용될 양성자 빔은 그림 3 과 같이 truncated 2D-Gaussian 형태를 갖는 빔전류 밀도를 갖는다 [4]. 양성자빔 밀도 분포는 $\sigma_x(z)$ 와 $\sigma_y(z)$ 값이 달라 빔축에 대해 360 도 대칭이 아니다. 핵파쇄 열생성 밀도는 빔의 전류 밀도에 대체적으로 비례하므로 핵파쇄 열생성 밀도 역시 truncated 2D-Gaussian 과 유사한 형태를 가질 것이다.

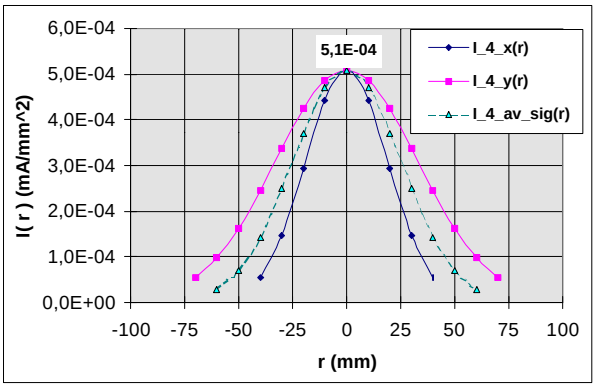


그림 3. MEGAPIE 표적 설계를 위한 양성자 빔밀도 분포 (575 MeV, 1.74 mA 경우) [4]

핵파쇄 열생성량은 LAHET 이나 FLUKA 와 같은 neutronic 코드에 의해 예측되는데 FLUKA 계산결과에 따르면 고에너지 양성자빔은 표적 및 구조물질과 충돌하면서 깊이 약 27 cm 의 영역에서 자신 에너지의 약 70%를 열로 변환시킨다 [6]. 본 연구에서는 참고문헌 [6]에서 제시한 열밀도 분포를 사용하였는데 FLUKA 계산결과를 fitting 하여 얻은 식이다. 먼저 Pb-Bi 표적에서 단위부피당 생성되는 열량은 아래의 식으로 모사하였다.

$$Q(z) = 1.35 * 10^9 * e^{-\frac{z}{z_a}} * \left[1.0 - e^{-\frac{(z+z_b)}{z_c}} \right] * \left[1.0 + 390.0 * (z_d - z) \times e^{-\frac{|z_d - z|}{z_e}} \right] * e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma_x(z)} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y(z)} \right)^2 \right]} \quad (\mathrm{W/m^3}) \qquad (1)$$

여기서, $Q(z)$ = 단위부피당 열생성량 (Watts/m^3),

z = 빔창안쪽면으로 부터의 높이 (m),

$z_a = 0.15$, $z_b = 0.045$, $z_c = 0.04$, $z_d = 0.265$, $z_e = 0.0055$ (m),

x, y = x, y **좌표** (m),

$\sigma_x(z) = 0.031955 + 0.0179z + 0.04z^2$ (m),

$\sigma_y(z) = 0.019652 - 0.0131z + 0.19z^2$ (m).

양성자 빔은 그림 3 **에서 보인 바와 같이** truncated Gaussian **형태이므로** $0.0 < z \le 0.125m$ **사이 높이 영역에서는 빔의 일부가** truncated **되어 아래 타원식 외부 영역에서는 열생성이 없다.**

$$F(x,y) = \left(\frac{x}{2.5\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{2.5\sigma_y}\right)^2 = 1 \qquad (2)$$

빔창에서의 열생성량은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$Q = 0.91 * 10^9 * e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]} (\mathrm{W/m^3}) \qquad (3)$$

여기서, $\sigma_x = 0.0331m$, $\sigma_y = 0.019m$. **빔창 역시 식** (2)**의 외부 영역에서는 열생성이 없다.**

그 밖에 가이드 튜브 및 빔창 튜브에서의 열생성량은 Pb-Bi **생성식을 따르며 빔창 안쪽면으로부터** 27cm **이상의 높이에서는 열생성이 없는 것으로 간주하였다. 그림** 4 **는 식**(1)**과** FLUKA **계산결과와의 비교를 보여준다.**

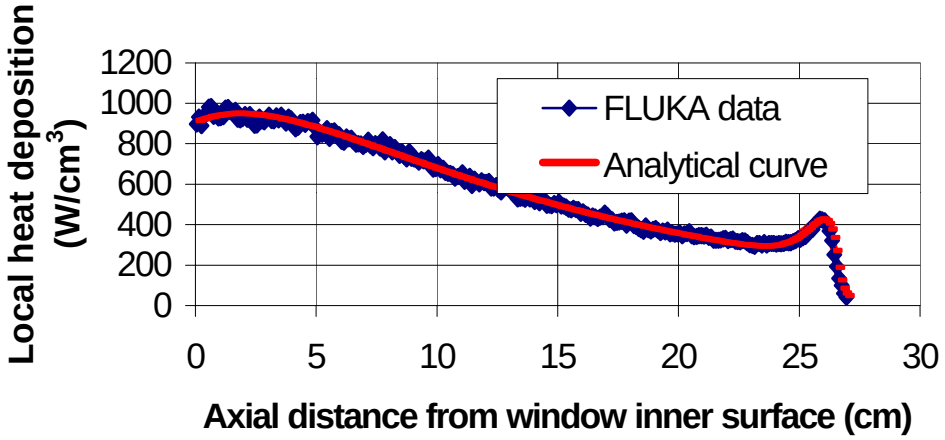


그림 4. FLUKA **계산결과와 식** (1)**의 비교** [6]

3.3 수치해석 방법 및 난류모델

압력방정식을 제외한 모든 방정식에 hybrid 차분방법을 이용하였고 압력보정은 SIMPLEC 알고리듬을 이용하였다. 난류모델은 logarithmic 벽함수를 갖는 표준 k-ε 난류모델을 이용하였다. 사용된 turbulent Prandtl 수는 0.9 이다. 각 방정식에 사용된 solver 는 아래와 같다.

- U,V, W : Block Stone
- Pressure : ICCG
- k, ε : Line Solver
- Enthalpy : Block Stone

3.4 경계조건 및 가정

inlet, outlet, symmetry 경계조건이 주어진 영역에 사용되었고 빔창, 빔창 튜브, 가이드 튜브, 중앙계측봉은 conducting solid 로 모사되었다. 모든 외부 wall 로의 열전달은 없는 것으로 가정하였다. inlet 에서는 균일한 속도 및 온도 분포를 가정하였다. 본 연구에서 사용된 Pb-Bi 입구유량은 40 kg/s, 입구온도는 230 ^{o}C 이다.

4. 수치해석 결과 및 토의

그림 3 에 나타낸 바와 같이 양성자 빔밀도가 빔축에 대해 대칭이 아니므로 빔 orientation 의 영향을 평가해볼 필요가 있다. 본 연구에서는 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축과의 방향을 두가지로 나누어 해석을 수행하였다. 첫 번째 경우(Case A)는 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축이 서로 평행한 경우이며 두 번째 경우(Case B)는 두 주축이 서로 수직인 경우이다.

그림 5 와 그림 6 은 Case A 계산결과 얻은 속도 및 온도 분포이며 그림 7 과 8 은 Case B 에 대한 속도 및 온도 분포이다. 또한 표 1 에 주요 CFX4 계산 결과를 나타내었다. 먼저 속도분포를 보면 Case A 와 Case B 에 대해 Pb-Bi 최대 속도는 1.12 m/s 와 1.05 m/s 로서 두 경우 모두 부식 및 침식을 우려할 수준이 아님을 알 수 있다. Case A 와 Case B 의 속도분포가 약간 차이를 보이는 것은 부력의 영향이 약간 존재하기 때문일 것이다.

온도 분포를 보면 빔창 최대온도가 Case A 와 Case B 에 대해 각각 551.8 ^{o}C, 485.5 ^{o}C 로 나타났다. 따라서 빔창물질 T-91 의 용융점을 고려한다면 우회 냉각 펌프가 고장난다 하더라도 빔창 파손과 같은 대형 사고로 이어질 가능성은 희박하다고 할 수 있다. 또한 Case A 보다 Case B 일 경우 66.3 ^{o}C 나 빔창 최대 온도가 낮음을 알 수 있다. 그러므로 빔의 주축이 절단면의 주축과 수직일 경우가 빔창 및 표적 냉각에 유리하다.

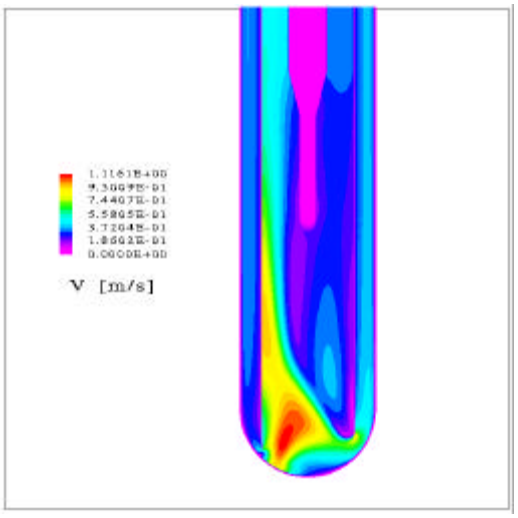


그림 5. 속도분포 계산결과(Case A)

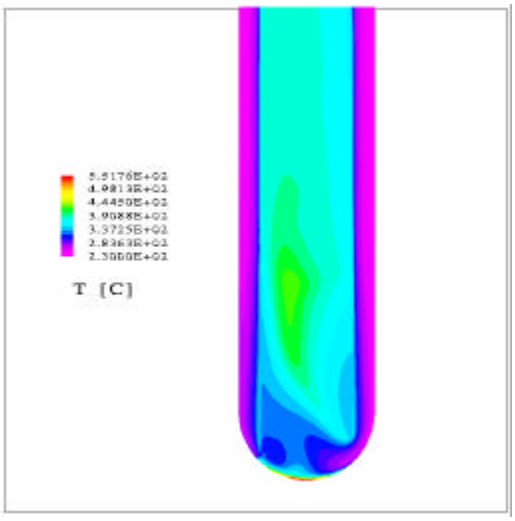


그림 6. 온도분포 계산결과(Case A)

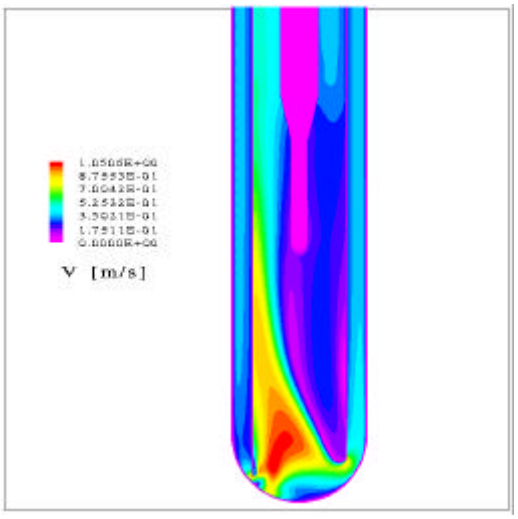


그림 7. 속도분포 계산결과(Case B)

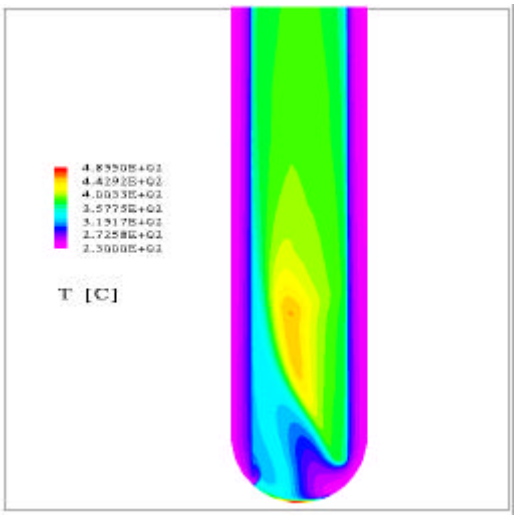


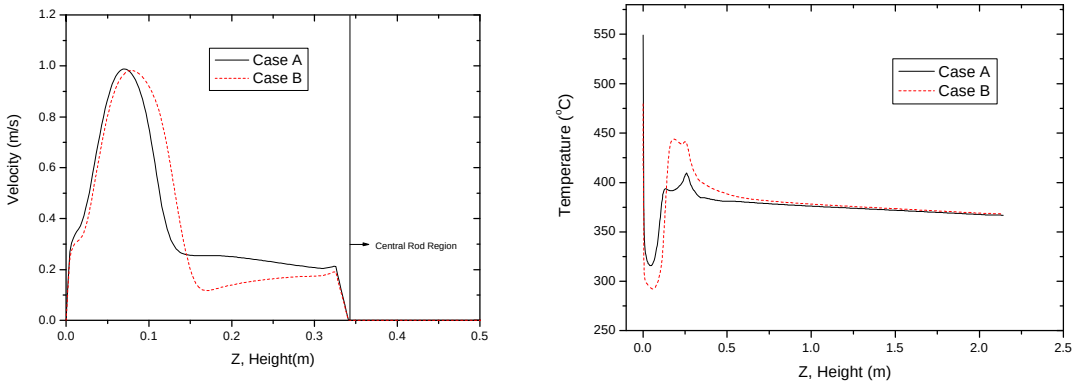
그림 8. 온도분포 계산결과(Case B)

중심축에 따른 속도 및 온도분포를 그림 9 에 나타내었다. 그림 9 를 보면 빔창 최대온도는 Case A 가 높지만 가이드 튜브 중심에 있는 중앙계측봉 영역에서는 Case B 의 온도가 더욱 높음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 표 1 의 중앙계측봉 최대온도에서도 확인할 수 있다.

동일한 계산을 수행한 CRS4 의 L. Maciocco et al. STAR-CD 계산결과[7]를 본 계산결과와 비교할 수 있도록 표 1 에 함께 나타내었다. STAR-CD 계산결과와 비교해 보면 CFX 4 계산결과가 빔창온도를 30~40 °C 정도 높게 예측함을 알 수 있다. 또한 Case B 에서 CFX 4 의 경우 Pb-Bi 최대온도가 빔창과의 접촉한 지점에서 발생하지만 STAR-CD 계산에서는 빔창과 떨어진 지점에서 발생한다는 차이를 보이고 있다. 이와 같은 차이점을 규명하기 위해 현재 본 연구에서 고려한 문제가 Benchmark M1.0 이란 이름으로 명명되어 Benchmark 계산을 수행하게 되었음을 짐작할 수 있다.

표 1. CFX 4 주요 계산결과 및 STAR-CD[7]와의 비교

	Case A		Case B	
	CFX 4	STAR-CD	CFX4	STAR-CD
Pb-Bi 최대속도	1.1161 m/s	1.347 m/s	1.0506 m/s	1.354 m/s
Pb-Bi 최대온도	517.4 °C	486 °C	461.8 °C	425 °C
평균 Pb-Bi 출구온도	349.3 °C	352 °C	349.7 °C	352 °C
빔창 안쪽 표면 최대온도	517.4 °C	487 °C	461.8 °C	414 °C
빔창 바깥쪽 표면 최대온도	551.8 °C	521 °C	485.5 °C	447 °C
가이드 튜브 최대온도	360.8 °C	376 °C	336.9 °C	370 °C
중앙계측봉 최대온도	390.6 °C	381 °C	403.4 °C	385 °C
입/출구 엔탈피차이	7.142 MW	7.149 MW	7.140 MW	7.125 MW



(a) 속도분포 (b) 온도분포

그림 9. 중심축에 따른 속도 및 온도 분포 비교

5. 결 론

본 연구에서는 CFX 4 상용코드를 이용하여 우회냉각이 없는 MEGAPIE 표적에 대한 전산 유체해석을 수행하였다. 우회냉각은 MEGAPIE 표적에 도입될 예정이다. 따라서 우회냉각이 없는 해석은 우회냉각펌프 고장을 가정한 해석이라고 할 수 있다. 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축과의 방향을 두가지로 나누어 해석을 수행하였다. 첫 번째 경우는 양성자 빔의 주축과 가이드 튜브 절단면의 주축이 서로 평행한 경우이며 두 번째 경우는 두 주축이 서로 수직인 경우이다. CFX 해석 결과 두 가지 경우에 대해서 빔창 최대온도가 551.8 °C 와 485.5 °C 로 나타났다. 따라서 양성자 빔의 주축을 가이드 튜브 절단면 주축과 수직이 되도록 설계하는 것이 빔창 및 표적 냉각에 유리한 것으로 나타났다. 빔창 물질인 T-91 의 용융점을 고려할 때 두 가지 경우에 대해 모두 우회냉각펌프가 고장난다고 하더라도 빔창파손과 같은 사고가 즉시 일어나지는 않을 것으로 판단된다.

본 연구에서 고려한 문제는 현재 Benchmark M1 이라는 이름으로 PSI, CEA, FZK, CRS4 등

의 공동연구 파트너들과 함께 해석을 수행하고 있다. 조만간 각 기관에서 계산된 계산결과들이 취합되어 비교 평가될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. WON S. PARK et al., “Transmutation Technology Development,” Korea Atomic Research Institute, KAERI/RR-2117/2000 (2000).
2. C. RUBBIA et al., “Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier,” CERN/AT/95-44(ET) (September 1995).
3. M. SALVATORES et al., “The MEGAPIE Initiative: Executive Outline and Status as per November 1999,” MPO-1-GB-6/0_GB.
4. F. GROESCHEL, “The MEGAPIE Project, An Overview,” Presentation Material at the Technical Review Meeting at Bologna, March 2002.
5. CFX-4 on-line Documentation, AEA Technology.
6. T. DURY, “Best-Estimate Fit for MEGAPIE Heat Deposition Profile Data of 19.2.01,” PSI Internal Note, November 2001.
7. L. MACIOCCO et al., “Benchmark Calculation of the MEGAPIE Target (M1),” CRS4-TECH-REP-02/11, February 2002.
8. S. BUONO, “S. Buono’s presentation on Italian Pb-Bi properties,” Minutes of the First Meeting of the Benchmark Working Group on Heavy Liquid Metal Thermal-Hydraulics, June 1999.
9. Nam-il Tak and X. Cheng, “Thermal Hydraulic Design of the Active Part of the MEGAPIE Target,” Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, Korea (May 2001).
10. P. ROUBIN, “Steady-state simulation of the lower target thermal hydraulics of MEGAPIE,”DTP/STH/LMTA/2001-12, CEA/Cadarache, June 2001.