

HYPER 표적에서 Diffuse Plate 의 냉각 성능 평가

Assessment of Cooling Performance of a Diffuse Plate in HYPER Target

탁남일, 송태영, 박원석

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

1000MWth HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor) 설계에 있어서 가장 큰 어려움은 핵과쇄 표적 빔창 냉각 문제에 의해 야기되고 있다. HYPER 핵과쇄 표적의 냉각 능력을 향상시키기 위한 수치적 연구가 진행중이다. 본 연구에서는 HYPER 조건에서 빔창 냉각 능력 향상에 있어 diffuse plate 의 효율성을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 전산유체코드로서 CFX 4 코드를 이용하였다. 빔창 및 핵과쇄 표적에서 발생한 열은 LAHEAT 코드 시스템에 의해 계산되어 CFX 4 코드의 입력자료로서 사용되었다. diffuse plate 는 세개의 기공률을 갖는 다공성 매질로 모사되었고 다양한 설계변수들(기공률, diffuse plate 두께, diffuse plate 와 빔창사이의 거리)에 대해서 수치계산을 수행하였다. CFX 4 계산 결과, HYPER 조건에서 diffuse plate 의 도입으로 약 10°C 의 최대 빔창온도 감소를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이 정도의 냉각효과는 HYPER 설계를 위해 충분하지 않으므로, 빔창 냉각 성능을 보다 향상시키기 위하여 우회 냉각 유량의 도입과 같은 다른 방안을 모색해야 할 것이다.

Abstract

Major difficulties are caused by cooling problems of the beam window of the spallation target in designing of 1000 MWth HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor). Numerical studies to improve the cooling capability of the window are on the way. In the present work, numerical analysis has been performed to assess the cooling performance of a diffuse plate in HYPER target conditions. The fluid dynamics code CFX 4 was used for the analysis. Heat depositions in the window and the target were calculated by the LAHEAT code systems and used as input data of the CFX 4 code. The diffuse plate was modeled as a porous media having three porosities. The analysis was performed for various design parameters (the porosity, the thickness of a diffuse plate, the distance between the plate and the window). The results of CFX 4 show that ~10°C of the

reduction of the maximum window temperature, which is not enough for the HYPER design, can be obtained with a diffuse plate. Therefore, another methods such as an introduction of a bypass injection have to be considered to improve the window cooling.

1. 개 요

HYPER 는 한국원자력연구소에서 개발 중인 가속기구동 미입계 핵변환로(accelerator-driven transmutation system)로서 사용후 핵연료에 존재하는 장수명 핵종(TRU, Tc-99, I-129)을 단수명 또는 안정 핵종으로 변환시킴과 동시에 부수적으로 전력생산도 목적으로 한다. HYPER 는 열 출력 1000 MW 를 목표로 하고 있으며 연간 약 258kg 의 TRU 를 소각시킬 수 있을 것으로 예상된다 [1]. HYPER 핵설계 연구결과에 따르면 가연성 흡수체와 같은 훌륭한 방식을 도입한다 할지라도 연소에 따른 반응도 감소 보상을 위해서는 적어도 20 mA 이상의 양성자 빔전류가 HYPER 운전을 위해 필요하다 [1]. 그러나 지금까지 고려되고 있는 단일 빔창 표적에서는 약 13mA 이상의 빔전류 조건에서 액체표적 Pb-Bi 의 최대온도가 설계기준값 500 °C 를 초과하고 있다 [1]. 그러므로 보다 효율적인 빔창 냉각을 위한 방안을 강구해야 한다.

최근의 몇가지 연구결과[2,3]에 따르면 핵과쇄 빔창의 냉각 성능을 향상시킬 목적으로 diffuse plate 의 도입을 고려하고 있다. diffuse plate 가 국부속도 및 난류를 증진시켜 빔창 냉각에 상당한 도움을 주는 것으로 알려져 있다. diffuse plate 는 그림 1 에 나타낸 바와 같이 얇은 두께의 판에 몇가지 크기의 구멍을 낸 것으로서 빔창 아랫부분에 장착된다 (그림 2 참조). diffuse plate 의 효율성은 참고문헌 2 와 3 을 통해 알 수 있으며 ISTC 표적 설계에서 도입될 것으로 보인다. 일반적으로 중앙의 구멍이 크고 가장자리의 구멍이 작게 설계되는데 이는 냉각 효율이 떨어지는 빔창 중앙 영역에 냉각 유량을 상대적으로 많이 주기 위한 것이다.

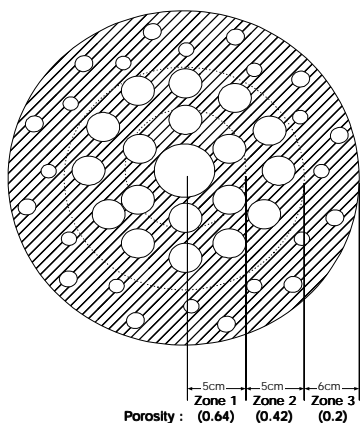


그림 1. diffuse plate 의 예[3]

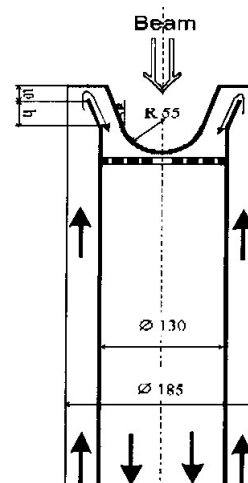


그림 2. diffuse plate 를 가진 FZK 의 ISTC 표적[2]

본 연구에서는 HYPER 조건에서 빔창 냉각 능력 향상에 있어 diffuse plate 의 효율성을 평가하기 위하여 전산유체코드 CFX 4 [4]를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 해석 모델 및 방법

2.1 HYPER 표적

HYPER 노심의 예비 핵설계 결과를 바탕으로 도출된 HYPER 표적 시스템의 사양은 그림 3에 나타낸 바와 같다. buffer zone의 크기는 핵설계와 표적설계의 최적화 연구를 통해서 결정되어야 한다. 핵설계 예비결과를 토대로 정한 buffer zone의 최대 크기로서 직경 66cm를 삼았다. HYPER에서는 빔창에 부과되는 열부하를 최소화하기 위하여 기존의 다른 표적들과는 달리 상대적으로 넓은 빔지름을 갖는 양성자 빔을 고려하고 있다. 본 연구에서 고려한 HYPER 표적 설계 사양은 기존 연구결과[1]을 참조한 것으로 35cm 빔직경과 40cm 빔창 내경, 2mm 빔창 두께를 갖는다. 핵과쇄를 위한 양성자빔은 1 GeV, 13mA를 가진 parabolic beam이다. 핵과쇄 표적이자 냉각재로 쓰이는 Pb-Bi는 빔창 아래에서 1.1 m/s, 340 °C 조건으로 유입된다.

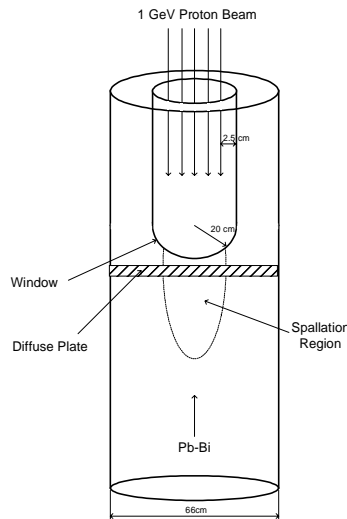


그림 3. diffuse plate 를 가진 HYPER 표적 시스템

2.2 전산유체 해석모델

HYPER 표적 설계조건에서 diffuse plate의 효율성을 평가하기 위하여 전산유체코드 CFX 4 [4]를 이용하였다. CFX 4 코드는 AEA사에서 개발한 범용 열수력해석 코드로서 finite volume method에 기초하였으며 body-fitted grid를 지원한다.

계산의 단순화를 위해 그림 3의 모형을 axisymmetric 형태로 가정하였다. 아울러 표적시스템으로 들어오는 Pb-Bi의 입구속도 및 입구온도는 균일하다고 가정하였다. 그림 4는 CFX 4 분석을 위한 diffuse plate를 가진 HYPER 표적의 axisymmetrical 2D 모델이다. diffuse plate는 그림 4에 보인 바와 같이 세 개의 기공률(porosity)을 가진 다공성 매질(porous media)로 모사하였

다. 난류계산을 위하여 logarithmic wall function 을 갖는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 해석의 가장 관심 사항인 빔창 중앙 부근에서의 y+ 값을 30 에서 100 사이에 들도록 meshing 을 하였다.

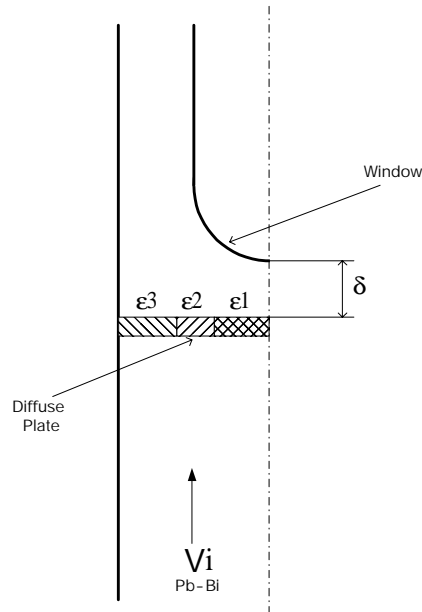


그림 4. CFX 4 분석을 위한 axisymmetrical 2D 모델

1 GeV 양성자 빔은 자신의 에너지중 약 60% 를 빔창 및 표적에서 열로 변환된다고 알려져 있다. 빔창 및 표적에서 발생된 열을 계산하기 위하여 본 연구에서는 LAHEAT 코드 시스템 [5]을 이용하였다. LAHEAT 코드 시스템에서 얻은 결과를 근사하여 아래와 같은 열생성식을 얻었다.

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

여기서 I=빔전류(mA), R=빔반경(cm), r=중심축으로 부터의 거리(cm) 이다. 위의 식은 빔창과 깊이가 10cm 이내인 Pb-Bi 에서 적용되며 깊이가 10-20cm, 20-30cm, 30-40cm, 40-50cm 인 Pb-Bi 의 경우에는 각각 위 식의 값에 0.59, 0.31, 0.14, 0.07 을 곱한 값을 사용하였다. 또한 위 식의 값은 반경이 R 보다 작고 깊이가 50cm 보다 작은 경우에만 적용하고 그 이외의 지역에서는 단지 미량의 열이 축적되므로 열발생이 없는 것으로 가정하였다. diffuse plate 도입에 따른 열생성량 변화는 고려하지 않았는데 가장 큰 관심대상인 빔창 온도에 큰 영향을 주지 않으리라 판단된다. 위 식에 따르면 본 연구에서 고려한 빔창에서의 최대 열유속은 1.016MW/m²으로서 HYPER 의 핵연료에서의 열유속값보다 크다. 이러한 사실은 빔창중앙에서 stagnation flow 가 형성됨과 맞물려 빔창 냉각의 어려움을 이야기해준다. 위 식(1)을 전산유체 코드인 CFX 4 코드의 입력자료로서 활용하여 계산을 수행하였다.

3. 수치해석 결과 및 토의

그림 5는 diffuse plate가 없는 HYPER 표적의 속도 및 온도분포 계산결과이다. diffuse plate가 없는 HYPER 표적은 시스템의 대칭 특성 때문에 빔창 중앙부에 stagnation 영역이 존재함을 확인할 수 있다. Pb-Bi 최대 속도는 빔창 옆면에서 발생하는데 그림 5가 입구속도 1.1m/s 계산결과이므로 입구속도가 이보다 커지면 Pb-Bi 최대 속도가 설계기준값을 초과할 것이다. 빔창 중앙부의 stagnation flow가 형성됨에 따라 이 부근에서의 열전달이 나빠져서 그림 5의 온도분포 계산결과에서 볼 수 있듯이 빔창 중앙부근에서 표적 및 빔창의 온도가 급격히 증가한다. 따라서 효율적인 빔창 냉각을 위해서는 stagnation flow를 최소화 할 수 있는 방안이 필요함을 알 수 있다.

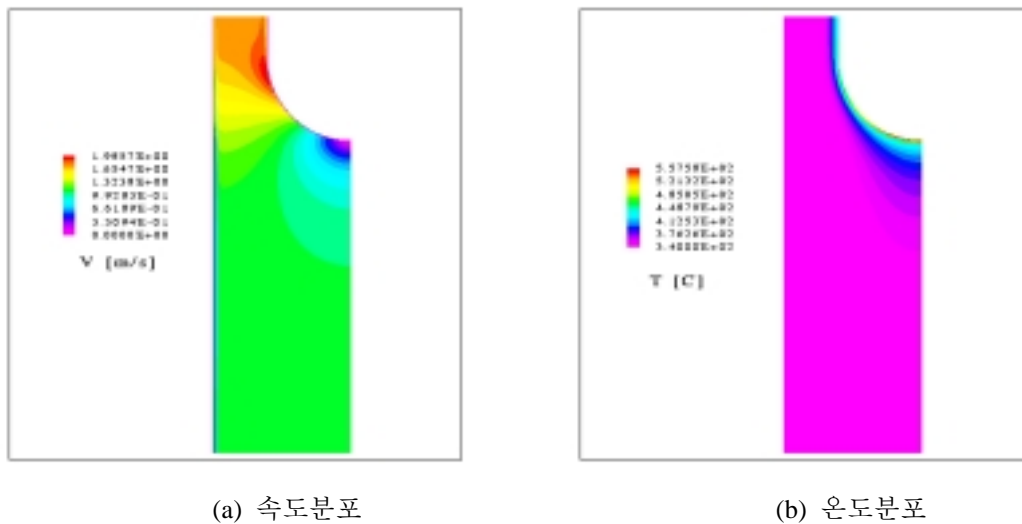
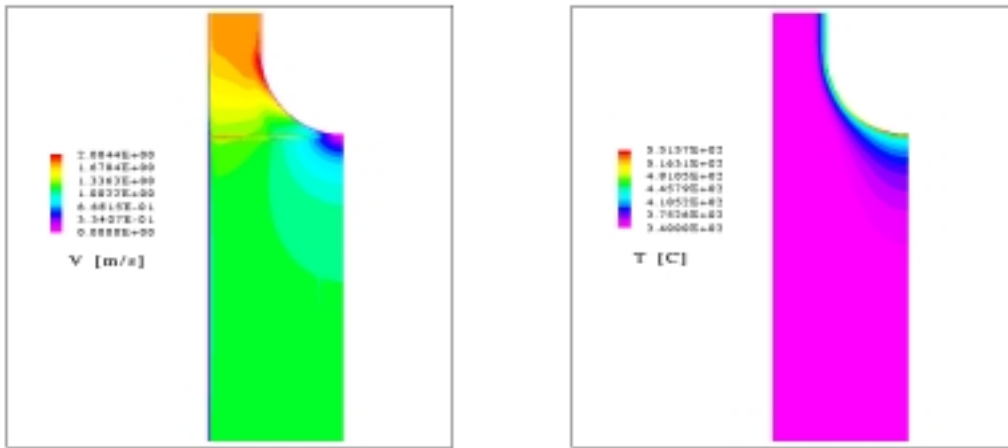


그림 5. diffuse plate가 없는 HYPER 표적의 속도 및 온도 분포 계산결과

그림 6은 diffuse plate를 가진 HYPER 표적의 속도 및 온도분포 계산결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 그림 6을 살펴보면 diffuse plate 내에서 유동면적 감소에 의한 Pb-Bi 속도 증가를 알 수 있다. 따라서 diffuse plate의 기공률 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 는 최대 Pb-Bi 속도가 설계제한값으로 고려되고 있는 2m/s를 만족하도록 고려되어야 한다. 특히 ϵ_3 의 경우 HYPER 조건에서 기공률이 0.6~0.7을 넘을 때 Pb-Bi 속도제한값을 넘어섬을 알 수 있었다. 이렇게 diffuse plate 가장 자리의 기공률이 크다는 점은 ISTC 표적에 쓰인 diffuse plate 가장자리 기공률 약 0.1~0.2와 커다란 차이를 보여준다. 기공률이 1.0에 가까울수록 고체영역이 적다는 의미이므로 diffuse plate의 역학적 건전성 면에서는 기공률이 작을수록 유리하지만 diffuse plate 내에서의 열생성도 존재하므로 작은 기공률은 냉각에 불리한 면이 있다.

그림 6에서 확인할 수 있듯이 diffuse plate의 도입에도 불구하고 stagnation 영역은 크게 사라지지 않음을 알 수 있다. 따라서 diffuse plate를 도입할 경우에도 빔창 냉각이 쉽지 않음을

예상할 수 있다.



(a) 속도분포

(b) 온도분포

그림 6. diffuse plate 를 가진 HYPER 표적의 속도 및 온도 분포 계산결과

$$(\epsilon_1=0.85, \epsilon_2=0.55, \epsilon_3=0.7, \delta=5\text{mm}, t=3\text{mm})$$

참고문헌 2에 따르면 diffuse plate의 기공률(ϵ), diffuse plate와 빔창사이의 거리(δ), diffuse plate의 두께(t)가 표적 열수력의 주요 변수임을 알 수 있다. 특히 diffuse plate의 두께는 diffuse plate에서의 열생성도 존재하므로 diffuse plate의 자체 냉각과 함께 diffuse plate의 역학적 건전성까지 고려해야만 한다. 그러나 몇가지 두께에 대한 CFX 4 분석 결과를 표 1에 나타내었듯이 diffuse plate 두께는 HYPER 표적 조건에서 빔창 온도나 diffuse plate 최대 온도에 커다란 영향을 주지 않았다.

표 1. Diffuse Plate 두께에 따른 CFX 4 계산결과

$$(\epsilon_1=0.85, \epsilon_2=0.55, \epsilon_3=0.7, \delta=5\text{mm})$$

Diffuse Plate 두께	Pb-Bi 최대속도	빔창최대온도	Diffuse Plate 최대온도
3 mm	2.0044 m/s	551.6 °C	453.5 °C
6 mm	2.0121 m/s	550.6 °C	453.6 °C
10 mm	1.9937 m/s	550.5 °C	453.9 °C

기공률을 변화시키면서 많은 CFX 4 계산을 수행한 결과 ϵ_2 및 ϵ_3 는 ϵ_1 (그림 4 참조)에 비해 빔창 냉각에 많은 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 그림 7은 diffuse plate가 도입되었을 때의 최대 빔창온도 감소량을 나타낸 것으로 빔창 중앙부에 가까운 기공률 ϵ_1 에 따른 냉각효과를 알 수 있다. 그림 7은 최적의 기공률이 존재함을 보여주는데 빔창과 diffuse plate의 거리에 따라 최적의 기공률이 변화함을 알 수 있다. 그리고 Pb-Bi 최대 속도의 변화가 적은 것은 빔창

중앙부를 흐르는 Pb-Bi의 양이 상대적으로 적고 최대 속도가 빔창 중앙부와 떨어진 곳에서 발생하기 때문이다.

diffuse plate와 빔창 사이의 거리(δ)를 변화시켜 보았는데 기존연구 결과[2,3]와는 달리 냉각 효과는 diffuse plate 중앙부의 기공률에 따라 다르다. ϵ_1 이 작은 영역에서는 δ 가 작을 때 낮은 냉각 효과를 보이지만 ϵ_1 이 큰 영역에서는 δ 가 클 경우 냉각 효과가 좋았다. 그러나 그 차이는 크지 않았다.

그림 7을 보면 알 수 있듯이 diffuse plate를 도입함으로써 최대 빔창온도를 약 10 °C 정도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 이 값은 ISTC 표적[2]에서 얻은 약 370 °C 가량의 최대 빔창 온도 감소와 비교해보면 매우 작은 값이다. 이렇게 기존 결과와 차이를 보이는 것은 ISTC 표적과 HYPER 표적의 설계사양이 geometry, Pb-Bi 유동 방향 등의 다양한 면에서 다르기 때문인 것으로 풀이된다. 특히 HYPER 표적 guide tube의 직경은 66cm로서 ISTC 표적 바깥쪽 guide tube 직경 18.5 cm보다 3 배이상 크며 Pb-Bi 평균속도도 커서 HYPER의 Pb-Bi 유량이 상대적으로 크다는 점과 HYPER diffuse plate 가장자리의 기공률이 크다는 점이 가장 큰 원인으로 예상된다. HYPER 표적의 속도 분포를 보면 ISTC 표적처럼 diffuse plate 가장자리 유동이 우회하여 중앙의 stagnation 영역으로 이동하지 않고 diffuse plate를 곧바로 침투함을 볼 수 있다.

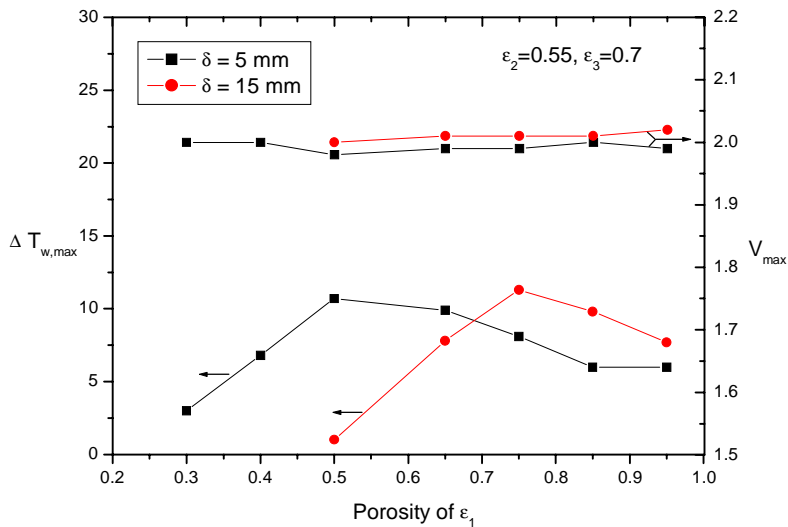


그림 7. ϵ_1 및 δ 에 따른 최대 빔창 온도감소량.

4. 결론

1000MWth HYPER 설계에 있어서 가장 큰 어려움은 핵과쇄 표적 빔창 냉각 문제에 의해서 야기되고 있다. 본 연구에서는 HYPER 조건에서 빔창 냉각 능력 향상에 있어 diffuse plate의 효율성을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 진산유체코드인 CFX4를 이용하여 다양한 설계변수들(기공률, diffuse plate 두께, diffuse plate와 빔창사이의 거리)에 대해서 수치계산을 수

행하였다. CFX4 에 의한 계산 결과, 약 10 °C 정도의 최대빔창온도 감소를 얻을 수 있었다. 따라서 diffuse plate 는 HYPER 조건에서 ISTC 와 같은 다른 표적들에서보다 효율성이 떨어짐을 알 수 있다. 빔창 최대 온도를 낮추기 위해서 Pb-Bi 입구온도를 낮추는 것은 시스템의 효율 등을 위해 바람직하지 않기 때문에 빔창 냉각을 획기적으로 개선할만한 우회 냉각 유량의 도입과 같은 다른 방안을 강구해야 할 것이다.

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. X. CHENG and I. SLESSAREV, "Thermal-hydraulic Investigations on Liquid Metal Target System," *Nuclear Engineering and Design*, **202**, 297 (2000).
3. YONG SUK LEE and CHANG HYUN CHUNG, "Thermal Hydraulic and Structural Analysis of Liquid Metal Target and Window," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Cheju, Korea (May 2001).
4. CFX-4 on-line Documentation, AEA Technology.
5. RICHARD E. PRAEL and HENRY LICHTENSTEIN, "User Guide to LCS : The LAHEAT Code Sytem," LA-UR-89-3014, Los Alamos National Lab. (1989).
6. C. RUBBIA et al., "Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier," CERN/AT/95-44(ET) (September 1995).
7. S. BUONO et al., "Numerical Studies Related to the Design of the Beam Target of the Energy Amplifier Prototype," *Heavy Liquid Metal Conference '98*, Vol. 1, p.249 (1998).
8. 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).