

< 기술논문 >

# 전산해석에 의한 일체형 원자로용 주냉각재 펌프의 성능분석

윤의수<sup>†</sup> · 오형우\* · 박상진\*\*

(2006년 2월 14일 접수, 2006년 6월 5일 심사완료)

## Performance Evaluation of a Main Coolant Pump for the Modular Nuclear Reactor by Computational Fluid Dynamics

Eui Soo Yoon, Hyoung Woo Oh and Sang Jin Park

**Key Words:** Hydrodynamic Performance(수력성능), Computational Fluid Dynamics(전산유동해석), Main Coolant Pump(주냉각재 펌프), Axial-flow(축류), Nuclear Reactor(원자로)

### Abstract

The hydrodynamic performance analysis of an axial-flow main coolant pump for the modular nuclear reactor has been carried out using a commercial computational fluid dynamics (CFD) software. The prediction capability of the CFD software adopted in the present study was validated in comparison with the experimental data. Predicted performance curves agree satisfactorily well with the experimental results for the main coolant pump over the normal operating range. The prediction method presented herein can be used effectively as a tool for the hydrodynamic design optimization and assist the understanding of the operational characteristics of general purpose axial-flow pumps.

### 기호설명

- $N_s$  : 무차원 비속도 [-]
- $H$  : 양정 [m]
- $p_s$  : 정압 [MPa]
- $Q$  : 유량 [ $m^3/hr$ ]
- $V$  : 절대속도 [m/sec]
- $W$  : 상대속도 [m/sec]
- $y^+$  : 벽면함수
- $\eta_s$  : 정압 효율

### 1. 서론

주냉각재 펌프(Main Coolant Pump; MCP)는 일체

형 원자로 내에서 1차 냉각재를 순환시킴으로써 핵연료 붕에서 발생한 열을 증기발생기로 전달시키는 역할을 한다. 일체형 원자로(System-integrated Modular Advanced Reactor; SMART)는 일체형원자로연구개발사업단(www.smart.re.kr)에서 개발하는 다목적 중소형 원자로로서 가압기, 주냉각재펌프, 증기발생기 및 제어봉구동장치 등의 1차계통 기기를 노심과 함께 하나의 압력용기(일체형 원자로) 내에 Fig. 1과 같이 설치함으로써 대형 냉각재상실사고를 근본적으로 배제하고, 액체 방사성 폐기물의 생성량을 크게 감소시킬 목적으로 개발하려는 차세대 원자로이다. 이는 해수 담수화 및 소규모의 전력생산에 사용될 열출력 330MWt 급 소형 원자로이다.

일체형원자로사업단에서는 65MWt 급 SMART Pilot Plant (SMART-P)를 설계하고 주요 구성품을 제작하였으며, 이 가운데 한국기계연구원의 본 연구팀에서는 주냉각재펌프의 성능검증시험을 수

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터  
E-mail : esyoon@kimm.re.kr  
TEL : (042)868-7358 FAX : (042)868-7335

\* 회원, 충주대학교 기계공학과

\*\* 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

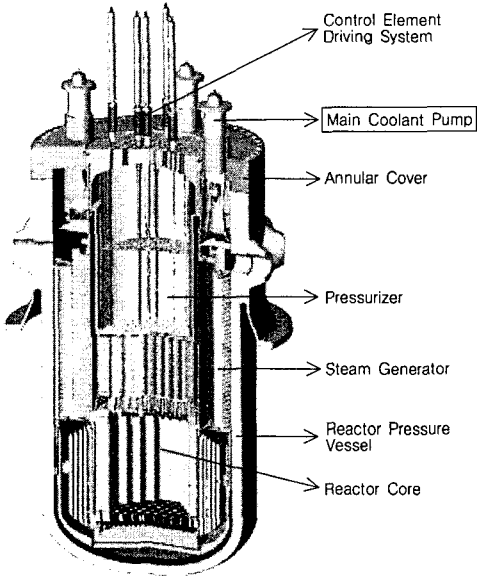


Fig. 1 SMART-P schematic diagram

행하였다.<sup>(1)</sup> 본 본문에서는 주요 구성품 중에 하나인 주냉각재 펌프를 유동해석에 의해 펌프의 성능을 분석하고, 해석결과를 성능측정치와 비교하고자 한다.

## 2. 주냉각재펌프

일체형 원자로의 내부 가동조건은 14.7MPa, 310℃이므로 MCP의 작동유체 조건도 이와 같으며, 작동유체는 약간의 암모니아와 질소가 용해되어 있는 초순수이다.

MCP는 축류형 캔드모터 펌프(axial canned-motor pump)로서 Fig. 1에 보이는 바와 같이 일체형 원자로 내에 수직으로 설치되며, Fig. 2과 같이 일반적인 수력부품인 동익(rotor, 임펠러)과 정익(stator, 디퓨저) 외에 환형 굴곡 입구유로(annular curved inlet duct)와 확대 출구유로 안내관(diverging exit duct)이 추가적으로 구성되어 있다. Fig. 3은 MCP 원형의 사진으로서 조립체, 임펠러, 디퓨저를 나타낸 것이다. 사진에 보이고 있듯이 날개의 수는 임펠러가 5개, 디퓨저는 9개이며, 날개의 형상은 DCA(double circular arc)형이다. 보통의 산업용 축류펌프와는 다르게 입구측이 180회전의 환형 굴곡 입구유로로 구성되어 있다. 출구는 그림에 나타난 바와 같이 확대관형이다.

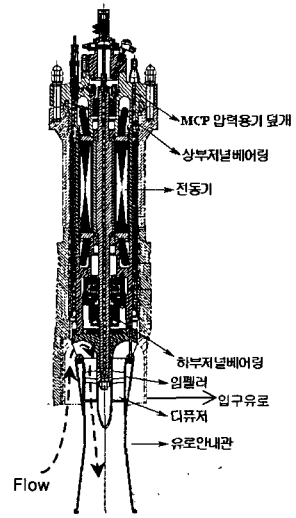
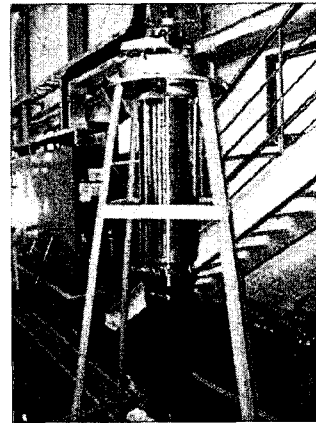
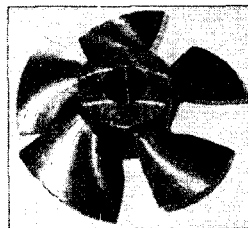


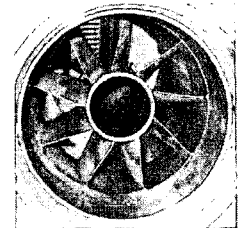
Fig. 2 MCP schematic drawing



(a) MCP assembly



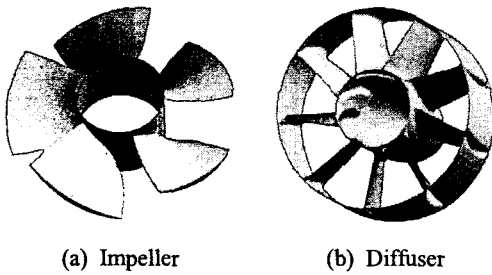
(b) Impeller



(c) Diffuser

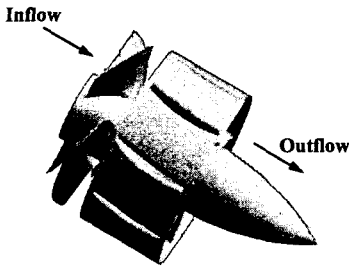
Fig. 3 MCP photographs

이 펌프의 설계점 조건은 유량 922m<sup>3</sup>/hr, 동압양정 9.0m, 회전수 3,600rpm으로서 무차원 비속도(non-dimensional specific speed, N<sub>s</sub>)는 N<sub>s</sub> = 6.63이다.

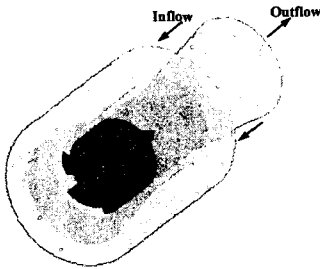


(a) Impeller

(b) Diffuser



(c) MCP hydraulic core



(d) MCP hydraulic parts

Fig. 4 MCP 3D modelling

본 논문에서는 잘 알려진 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX 10.0<sup>(2)</sup>을 사용하여 MCP의 내부유동을 해석하고 수력성능특성을 분석하였다. 여기서 MCP 원형의 전산해석 격자를 생성시키기 위하여 ANSYS ICEM CFD 10.0<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

### 3. 전산해석 방법

ANSYS CFX 10.0은 다양한 터보기계의 성능특성을 예측하는데 널리 사용되어 왔으므로<sup>(4-9)</sup> 계산 성능이 검증되었다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 ANSYS ICEM CFD 10.0을 사용하여 생성한 축류형 MCP의 3차원 모델이며, Fig. 5는 전산해석용 격자를 나타낸 것으로서 총 639,690

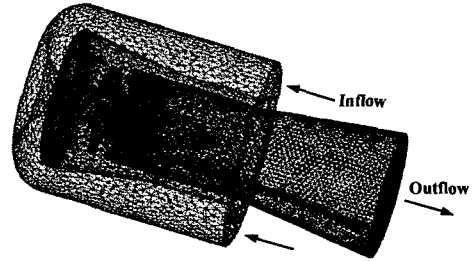


Fig. 5 MCP computational meshes

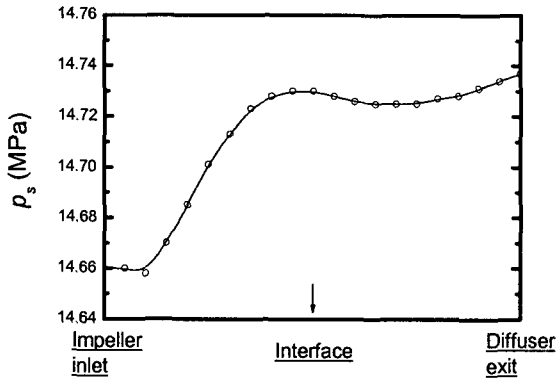
개의 노드와 1,965,986개의 요소 (1,171,661개의 사면체, 794,325개의 각주)로 구성되어 있으며, 계산영역은 입구유로, 임펠러, 디퓨저, 출구유로를 포함하고 있다. 난류모형의 자동벽면처리 조건 (automatic wall treatment)<sup>(2)</sup>인  $y^+ \leq 200$ 을 만족시킬 수 있도록 벽면 근처에서의 요소의 크기를 정하였다.

본 연구에서는 유동박리현상을 동반한 3차원 난류유동에 대하여 신뢰성 높은 전산해석을 수행하기 위해  $k-\omega$  기반의 전단응력전달모델( $k-\omega$  based shear stress transport model)을 사용하였다. 경계조건으로서 입구경계에서 압력을, 출구경계에서 질량유량을 규정하여 주었다. 입구유로, 디퓨저 및 출구유로는 고정좌표계이다. 그리고 임펠러 영역에서 쉬라우드 없는 임펠러(unshrouded impeller)의 날개와 허브면은 회전좌표계이지만 임펠러의 케이싱 벽면은 고정좌표계이다.

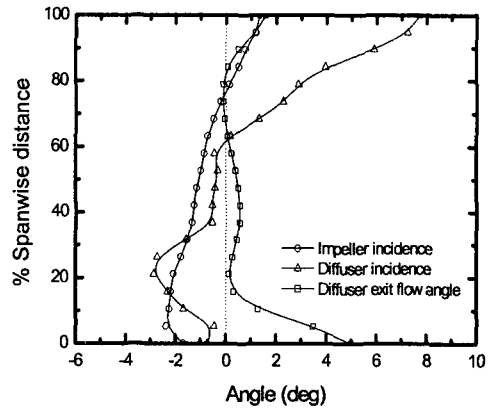
### 4. MCP의 전산해석 결과

Fig. 6은 일체형 원자로의 실제 설계점 가동조건(14.7MPa, 310℃, 회전수 3,600rpm, 유량 922m<sup>3</sup>/hr)에 대한 MCP 내부유동 해석결과로서, 유선방향(streamwise distance) 0%는 날개의 전단(leading edge)을, 100%는 후단(trailing edge)을 나타내며, 그리고 날개높이방향(spanwise distance) 0%는 허브를, 100%는 팁을 각각 의미한다.

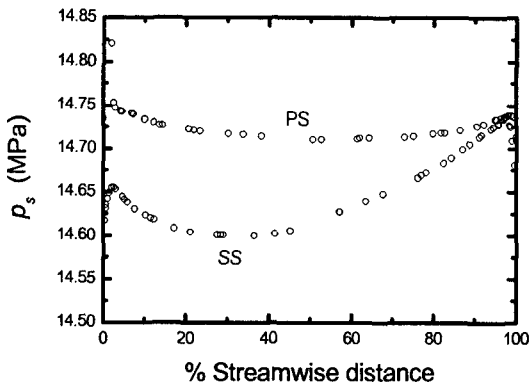
Fig. 6(a)는 임펠러 입구부터 디퓨저 출구까지 유선에 따라 정압분포를 나타낸 것으로서 정압은 급격한 변화 없이 매끄럽게 상승함을 보이고 있다. Fig. 6(b), 6(c)는 임펠러의 중간 반경 지점(mid-span)에서 정압 날개부하와 상대속도 분포를 각각 나타낸 것이다. Fig. 6(b)를 보면 정압 날개부하는 교차되지 않고 원활하게 형성되어 있으나



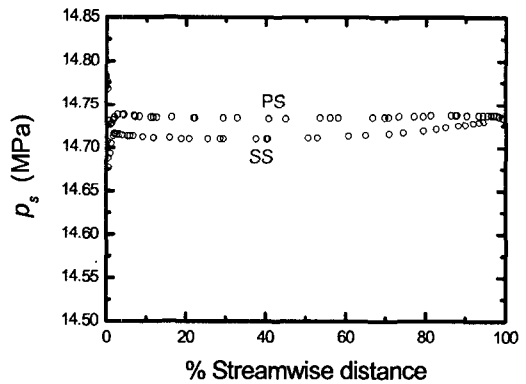
(a) Streamwise static pressure distribution



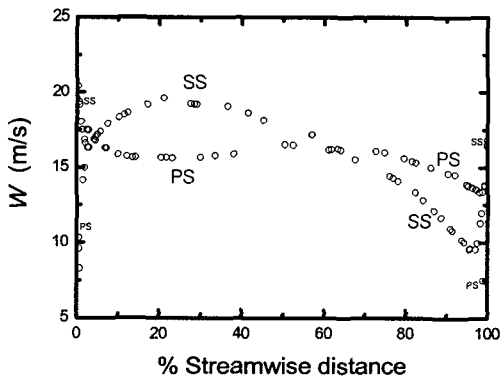
(d) Incidence and exit flow angle



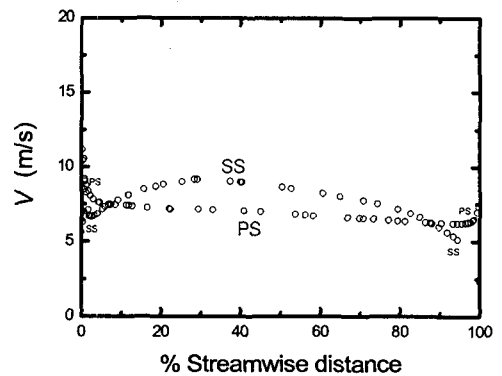
(b) Static pressure blade loading at the impeller



(e) Static pressure blade loading at the diffuser



(c) Relative velocity distribution at the impeller



(f) Absolute velocity distribution at the diffuser

Fig. 6 Detailed performance characteristics of the MCP at the design point


날개 후단에서 날개부하가 비교적 작게 나타나고 있다. Fig. 6(c)는 상대속도 분포를 나타낸 것으로서 유선방향 60% 지점에서 압력면(pressure surface; PS)과 흡입면(suction surface; SS)의 속도 분포가 교차하고 있다. Braembussche<sup>(10)</sup>는 상대속도 분포가 와 같은 형상을 갖는 것이 바람직하다고 제시하였다. 따라서 Fig. 6(c)와 같은 속도 분포의 교차는 유동의 구조를 왜곡함으로써 펌프 효율을 감소시키는 요인으로 작용하며, 이는 임펠러의 날개각 및 날개 두께의 분포가 원인인 것으로 판단된다. 그리고 전단 부분에서 속도분포가 교차, 반전된 것은 입사각(incidence)이 음(-)의 값을 갖기 때문에 나타난다. 그러나 Fig. 6(d)에 보이는 바와 같이 50% 날개길이에서 입사각이 -1.5로 아주 작으므로 이것이 후류의 유동형상과 성능에 주는 악영향은 그다지 크지 않은 것으로 분석된다.

Fig. 6(e), (f)는 디퓨저의 날개부하 및 속도분포를 나타낸 것이다. 디퓨저의 정압 날개부하[Fig. 6(e)]는 날개의 전단을 제외하면 비교적 원활히 형성되고, 정압이 약 14.72MPa에서 약 14.73MPa로 0.01MPa(양정으로는 약 1.5m)가 상승하고 있다. 그러나 Fig. 6(f)를 보면 날개의 전단과 후단 측에서 속도분포가 교차하여 Braembussche의 바람직한 분포와는 다른 형상을 보이고 있다. 이것은 디퓨저의 입사각이 음(-)의 값을 가지거나 날개각과 날개두께의 분포가 적절하지 못해서 생기는 결과일 수 있다. 그러나 Fig. 6(d)를 보면 50% 날개길이에서 디퓨저의 입사각은 약 -0.5 정도로 아주 작으므로 입사각에 의한 성능저하는 크지 않을 것이다.

Fig. 6(d)를 보면 임펠러의 입사각은 전체 날개 길이에서 작아서 양호하고, 디퓨저의 입사각은 팁(100% span) 근처에서 큰 값(7.5)을 갖는 것을 제외하고는 대체로 양호함을 알 수 있다. 그리고 디퓨저 출구의 유동각은 허브 측(0% span)을 제외하고 비교적 작아 출구회전속도(exit swirl velocity)에 의한 손실은 크지 않은 것으로 해석된다.

Fig. 6에 나타난 전산해석 결과를 종합적으로 살펴보면, 펌프의 수력성능을 향상시키기 위해서는 임펠러와 디퓨저의 속도분포가 교차되지 않고 원활하게 형성될 수 있도록 날개각 및 날개두께를 적절히 분포시킬 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 설계점 및 탈설계점에서 전산 유동해석에 의하여 예측한 MCP의 성능특성을 성능시험<sup>(1)</sup>과 비교한 것이다. 성능시험에서 양정 측정용 압력공(pressure tap)은 Fig. 5의 입구 경계면과 출구 경계면의 위치에 설치되어 있다. 따라서 계산과 실험의 결과를 정량적으로 비교하기 위해, 여기서는 MCP의 정압양정을 실험에서 차압이 측정된 위치를 기준으로 정의하였다.

Fig. 7은 MCP가 일체형원자로 내에서 작동하는 것과 동일한 실제의 운전조건(14.7MPa, 310°C)에서 작동하는 경우에, Fig. 8은 저온·저압(2.0MPa, 25°C)에서 작동하는 경우에 대하여 계산과 실험을 비교한 것이다. 설계 회전수인 3,600rpm 외에 2,700rpm과 1,800rpm에 대해서도 비교하였다. 여기서 정압효율은 앞서 언급한 정압양정에 유량을 곱한 후, 펌프 축동력으로 나눈 것으로 정의하였다. Fig. 7(a), 8(a)에서 보이고 있듯이 정압양정의 계산은 실험과 전체 운전영역에서 비교적 잘 일치하고 있다. 다만 낮은 유량에서 계산은 실험보다 낮게 예측하고 있는데, 이는 낮은 유량에서 펌프의 내부유동이 유동박리, 재순환 등의 영향으로 매우 불안정하기 때문이며 일반적으로 난류모델에 근거한 전산해석으로서 이를 정확히 해석하는 것이 매우 어렵다. 정압양정에 대하여 낮은 유량을 제외하고는 통상적인 운전범위 내에서는 계산과 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(b), 8(b)는 축동력을 나타낸 것이며 앞서 설명한 정압양정과 동일한 경향을 보이고 있다.

한편, Fig. 7(c), 8(c)는 정압효율을 나타낸 것으로서 실험결과와 정량적으로 차이를 보이고 있으나, 정성적인 측면에서 예측성능곡선은 전체 유량범위에서 수력성능시험과 유사한 결과를 보이고 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 상용 CFD 코드를 활용하여 향후 새로 설계될 축류형 펌프의 최대효율 유량조건을 도출하는데 적용할 수 있음을 의미한다. Fig. 7(c), 8(c)에서 효율의 측정치는 약 70% 수준으로 비교적 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 Fig. 6(c), 6(f)에서 언급하였듯이 속도가 적절히 분포되지 않았기 때문이다.

지금까지 검토한 결과를 종합해 보면, 본 연구에서 사용한 전산해석기법은 효율을 제외하고 축류형 MCP의 성능을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 축류형 펌프에 대하여 설계점에서의

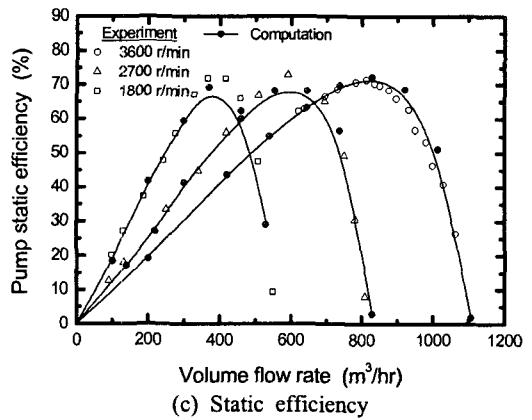
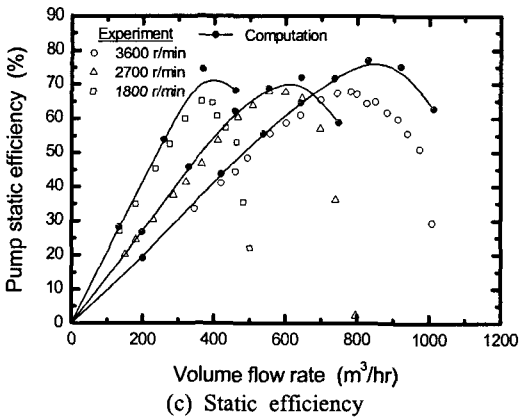
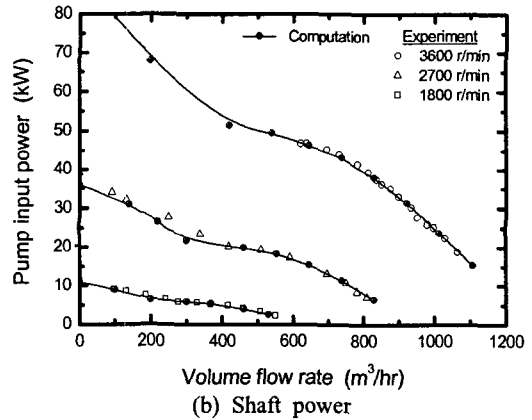
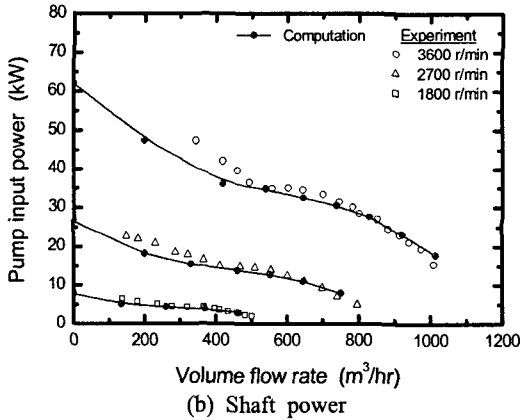
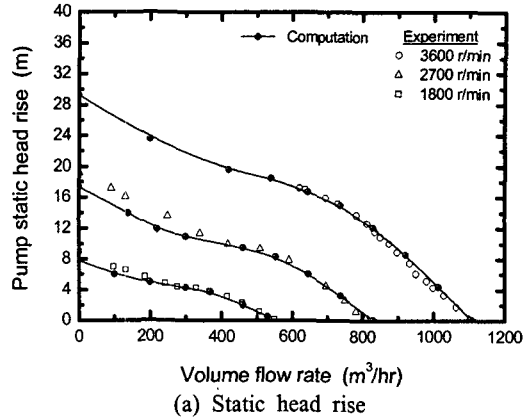
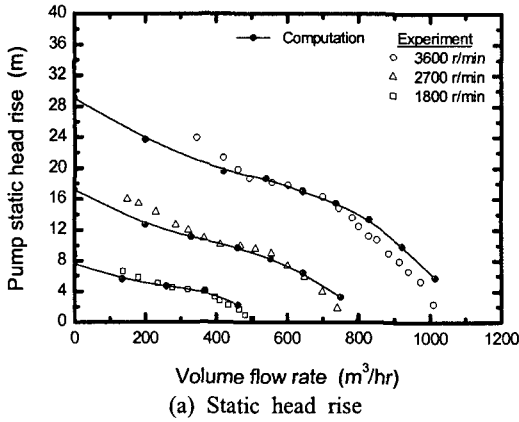


Fig. 7 Hydraulic performance curves of the MCP under the actual pressure and temperature condition of nuclear reactor

Fig. 8 Hydraulic performance curves of the MCP under the low pressure and temperature condition

최적설계 및 탈설계점에서의 성능예측에 유용하게 사용될 수 있는 것으로 밝혀졌다.

## 5. 결 론

검증된 상용 CFD코드를 이용하여 일체형 원자로용 축류형 MCP의 수력성능을 해석하였다. MCP의 실제 가동조건(14.7MPa, 310°C)과 저온-저압 조건(2.0MPa, 25°C)에 대하여 전산해석결과를 실험값과 비교하였다. 낮은 유량범위를 제외한 통상적인 작동범위에서 성능시험결과를 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

이 전산해석기법은 MCP는 물론 일반적인 축류형 펌프에 대하여 최적의 상세설계와 탈설계점에서의 성능특성을 해석하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Park, S. J., Yoon, E. S., Heo, P. W., Kim, D. and Oh, H. W., 2005, "Qualification Test of Main Coolant Pump for an Integral Type Reactor," *Proc. of the KFMA Annual Meeting*, Changwon Univ., Dec. 1~2, pp. 509~513.
- (2) ANSYS CFX 10.0, ANSYS, Inc.
- (3) ANSYS ICFD 10.0, ANSYS Inc.
- (4) Sell, M., Treiber, M., Casciaro, C. and Gyarmathy, G., 1999, "Tip-clearance-affected Flow Fields in a Turbine Blade Row," *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: J. Power and Energy*, Vol. 213(A4), pp. 309~318.
- (5) Koumoutsos, A., Tourlidakis, A. and Elder, R. L., 2000, "Computational Studies of Unsteady Flows in a Centrifugal Compressor Stage," *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: J. Power and Energy*, Vol. 214(A6), pp. 611~633.
- (6) Liu, S., Nishi, M. and Yoshida, K., 2001, "Impeller Geometry Suitable for Mini Turbo-pump," *Transactions. ASME, J. Fluids Engineering*, Vol. 123, pp. 500~506.
- (7) Hu, P. and Zangeneh, M., 2001, "CFD Calculation of the Flow Through a Water-jet Pump," International Conference on *Waterjet Propulsion III*, Gothenburg, Sweden, Paper No. 14 (The Royal Institution of Naval Architects, London).
- (8) Oh, H. W., Yoon, E. S., Kim, K. S. and Ahn, J. W., 2003, "A Practical Approach to the Hydraulic Design and Performance Analysis of a Mixed-flow Pump for Marine Waterjet Propulsion," *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A: J. Power and Energy*, 217(A6), pp. 659~664.
- (9) Park, M. R., Yoo, S. Y., Oh, H. W. and Yoon, E. S., 2006, "Hydraulic Design Optimization and Performance Analysis of a Centrifugal Blood Pump," *Trans. of the ASME*, Vol. 30, No. 1, pp. 87~94.
- (10) Braembussche, R. A., "Application of Inverse Methods to 3D Turbine and Compressor Blade Design," *Turbomachinery Blade Design Systems*, edited by Braembussche R. A., VKI Lecture Series 1999-02, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.