

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.8.1059

ISSN 1226-4873

스마트 원자로냉각재펌프의 축소모형에 대한 수력성능 예측[§]

권순국*[†] · 박진석* · 유제용* · 이원재*

* 한국원자력연구원

Prediction of Hydraulic Performance of a Scaled-Down Model of SMART Reactor Coolant Pump

Sun Guk Kwon*[†], Jin Seok Park*, Je Yong Yu* and Won Jae Lee*

* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received March 15, 2010 ; Revised June 3, 2010 ; Accepted June 7, 2010)

Key Words: Reactor Coolant Pump(원자로냉각재펌프), Hydraulic Performance Prediction(수력성능예측), Mixed-Flow Pump(사류펌프)

초록: 본 연구에서는 SMART 원자로의 사류형 원자로냉각재펌프의 축소모형에 대한 수력성능을 예측하기 위하여 설계점을 포함한 다양한 탈설계점에서의 해석을 수행하였다. 계산시간의 효율성을 위하여 임펠러와 디퓨저 각 1개 유로로 이루어진 계산영역을 해석대상으로 선정하였다. 임펠러와 디퓨저간의 정보교환을 위하여 스테이지 기법을 사용하였다. 정상상태 비압축성 유동조건에서 축소모형의 수력성능특성을 파악하기 위하여 해석영역의 입구와 출구에서 압력차를 측정하여 양정, 효율과 축동력을 산출하였다. 수력성능 곡선은 일반적인 사류펌프의 성능특성을 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 저유량에서의 펌프 내부유동의 복잡한 흐름을 확인하였다.

Abstract: An analysis was conducted to predict the hydraulic performance of a reactor coolant pump (RCP) of SMART at the off-design as well as design points. In order to reduce the analysis time efficiently, a single passage containing an impeller and a diffuser was considered as the computational domain. A stage scheme was used to perform a circumferential averaging of the flux on the impeller-diffuser interface. The pressure difference between the inlet and outlet of the pump was determined and was used to compute the head, efficiency, and break horse power (BHP) of a scaled-down model under conditions of steady-state incompressible flow. The predicted curves of the hydraulic performance of an RCP were similar to the typical characteristic curves of a conventional mixed-flow pump. The complex internal fluid flow of a pump, including the internal recirculation loss due to reverse flow, was observed at a low flow rate.

1. 서 론

SMART(System integrated Modular Advanced Reactor)는 증기발생기, 원자로냉각재펌프 및 가압기를 하나의 용기 안에 집약시킨 일체형원자로이다. 따라서 각 구성요소 간을 이어주는 대형배관을 제거하여 냉각재 상실사고를 원천으로 배제하였다. 원자로냉각재펌프는 Fig. 1에 보이는 형태로 노심에서 발생하는 열을 흡수한 냉각재를 강제순환 시켜 2차 냉각재가 흐르는 증기발생기에 공급하여 열교환을 통한 냉각을 유도하

고 냉각된 일차 냉각재가 다시 노심으로 계속적으로 유입하게 하는 역할을 한다. 이러한 원자로냉각재펌프는 SMART 원자로가 안정된 상황에서 계속된 운전 을 가능케 하는 핵심 구성요소 중 하나이다.

원자로 운전시 발생하는 각종 사고시에 있어서 펌프에 유입되는 유동조건에 따른 원자로냉각재펌프의 성능변화는 원자로 설계시 반드시 반영되어야 하는 기초 자료이다. 따라서 원자로냉각재펌프에 대한 다양한 운전범위에서의 성능시험은 대단히 중요한 의미를 가진다. 그러나 실제 펌프에 대한 성능시험은 펌프 크기에 따라 여러 제한을 가진다. 따라서 일반적으로 축소모형을 이용하여 펌프성능을 측정한다. 최근 Choi 등⁽¹⁾은 펌프의 성능을 예측하기 위하여 ATLAS(Advanced Thermal-

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학 부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임

† Corresponding Author, sgkwon5@kaeri.re.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

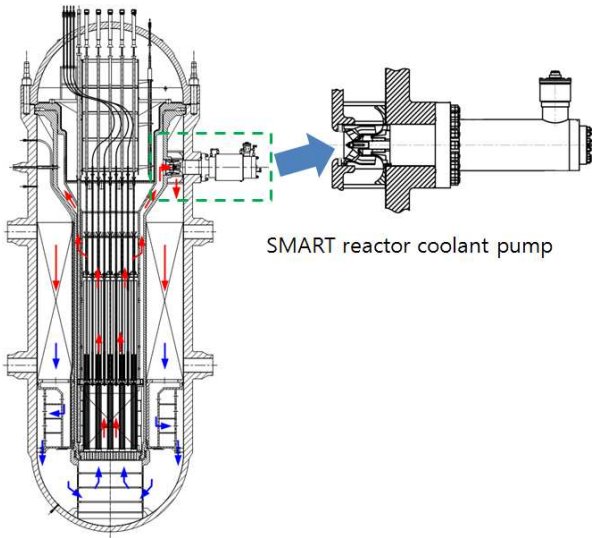


Fig. 1 SMART reactor assembly

hydraulic test Loop for Accident Simulation) 시험 설비를 이용하여 전 운전범위에서의 single-phase homologous 곡선을 획득하였다. 그러나 시험은 펌프내부에서 일어나는 유체유동을 상세히 확인하기 어려운 단점이 있고, 펌프성능시험 완료 전 펌프성능자료가 타 설계분야의 입력 자료로 필요한 경우도 있다. 따라서 최근 전산유체역학을 이용하여 펌프내부의 삼차원 유동특성을 파악하고 성능을 예측하려는 시도가 활발히 진행 중이다.⁽²⁻⁶⁾

본 연구에서는 원자로냉각재펌프 개발시 다양한 운전조건에서 원자로냉각재펌프의 성능특성을 예측하고 시험전 타 분야 설계입력 자료로 사용될 homologous 곡선을 생성하기 위한 기초 자료로서 수력성능특성을 확인하였다. 수치해석범위는 정방향 유동에 임펠러가 정상회전 할 때 유입유량을 설계유량 대비 20% 에서 140% 까지 변화시켜가며 총 7가지 유량에 대한 해석을 수행하였다.

2. 해석대상 및 전산해석 방법

본 연구의 해석대상은 RCP의 축소모형으로 임펠러와 디퓨저로 구성되어있다. 수력성능예측에 사용된 해석대상의 비속도 $N_s = 1060$ 이다. 여기서 비속도(N_s)는 양정(head, H), 유량(Q), 회전수(n , rpm)를 바탕으로 산출되며 펌프특성 및 형식 결정 등에 이용되는 값으로 그 식은 식 (1)과 같다.

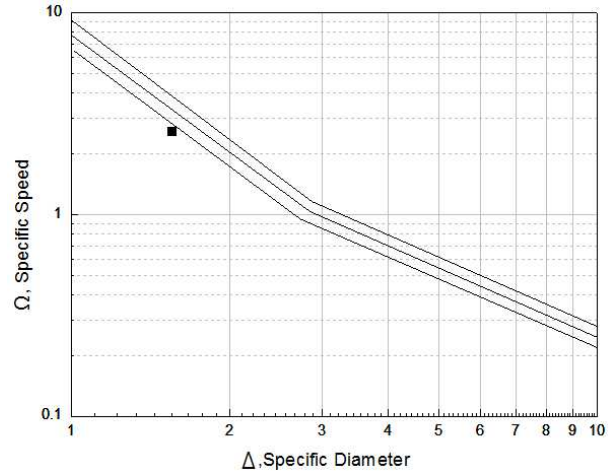


Fig. 2 The location of SMART RCP(square point) on the cordier diagram⁽⁷⁾

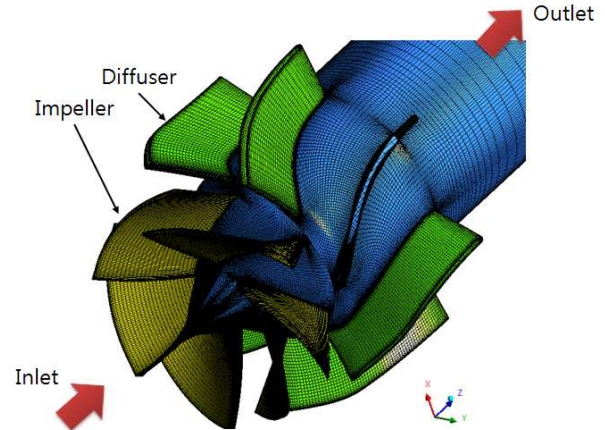


Fig. 3 Surface grids of computational domain

$$N_s = \frac{n \times Q^{0.5}}{H^{0.75}} \tag{1}$$

또한 Fig. 2와 같이 SMART RCP의 설계사양으로부터 Cordier가 제시한 비속도(Ω)와 비직경(Δ)을 계산하여 Cordier 선도에 나타낸 결과, 적절한 형상을 선택했음을 확인하였다. Cordier가 제시한 무차원 비속도와 비직경식은 아래 식 (2)와 (3)과 같다.

$$\Omega = \frac{\omega \times Q^{0.5}}{(g \times H)^{0.75}} \tag{2}$$

$$\Delta = \frac{D \times (g \times H)^{0.5}}{Q^{0.5}} \tag{3}$$

여기서 ω 는 회전속도(sec^{-1}), D 는 임펠러 직경(m)이다.

Table 1 The results of the grid dependency test

Case	The number of grids [EA]	Head [m]	Discrepancy [%]
1	100,000	24.61	4.24
2	300,000	25.50	0.78
3	500,000	25.55	0.58
4	1,000,000	25.70	0.00

$$* \text{Discrepancy} = \frac{\text{Case4} - \text{Each_case}}{\text{Case4}} * 100$$

해석대상은 Fig. 3과 같은 형상으로서 임펠러와 디퓨저로 이루어져 있으며, 각 날개의 수는 임펠러가 6개, 디퓨저가 7개이다.

해석에는 ANSYS CFX가 사용되었다. 입구 임펠러와 디퓨저의 각 유로는 동일한 유량이 유입된다는 가정 하에 주기(periodic) 경계조건을 사용하여 단일유로만이 고려되었다. 회전좌표계에서 계산되는 임펠러와 고정좌표계에서 계산되는 디퓨저 간의 경계면에는 스테이지(stage) 기법을 적용하였다. Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 식을 계산하는 전체 해석영역에서 임펠러의 밸런스 홀과 임펠러 슈라우드와 케이싱간의 간극은 제외하였다.

난류모델은 유체박리의 양과 시작 시점의 정확한 예측을 위하여 Bardin 등⁽⁸⁾에 의한 다양한 연구를 통하여 확인된 $k-\omega$ 기반의 shear stress transport (SST) 모델을 사용하였고 입구에서의 난류 강도는 5%를 적용하였다. 비압축성 유체유동으로서 유체의 온도변화는 고려하지 않았다.

지배 방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, high resolution 기법을 사용하였다.⁽⁹⁾ 이때 임펠러와 디퓨저의 전단(leading edge)과 후단(trailing edge)은 각각 J-grid 와 I-grid 가 적용되었다. 격자 의존성 확인을 위하여 Table 1과 같은 격자수를 이용하여 해석을 수행한 결과 양정의 차이가 30만 개 이상에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 30만 개에 해당하는 299,725 개의 격자모델이 사용되었다. 임펠러 뒷전을 제외한 임펠러 표면의 y^+ 는 50 이하로서 자동벽면 처리 조건인 $y^+ \leq 200$ 을 만족하도록 하였다.

시간간격은 $\Delta t = 1/(10 \omega)$ 를 적용하였다. 유체해석영역의 경계조건으로서 입구에는 전압조건을, 출구에는 질량유량조건을 적용하였다. 해석에 사용된 유체는 실제 시험운전조건에서의 사용될 4 °C 물을 사용하였다.

3. 전산해석 결과

3.1 설계점에서의 유동해석 결과

Fig. 4~Fig. 9는 원자로냉각재펌프 축소모형의 설계점에 대한 해석결과이다. Fig. 4는 해석영역 허브, 임펠러와 디퓨저 표면의 압력분포와 함께 유선을 나타낸 그림이다. 전체적으로 임펠러를 지난 유체의 압력이 디퓨저에서 앞전과 슈라우드 일부분을 제외하면 일정한 크기의 압력으로 발달하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 임펠러와 디퓨저의 허브와 슈라우드의 각 스핀방향 위치에 따른 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 압력분포를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5로부터 반경방향 길이가 증가함에 따라 상대회전속도가 커지므로 임펠러 외경으로 갈수록 유체압력상승에 크게 기여함을 알 수 있다. Fig. 6에서는 전체 반경방향에서 압력의 크기가 임펠러 후단으로 갈수록 비슷한 크기를 가지는 것을 알 수 있다. 10% 스핀부위에서의 흐름방향(streamwise) 40% ~ 60% 사이에서 압력면과 흡입면간의 압력차이가 미미한 수준으로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 현상은 디퓨저 외경에 비해 상대적으로 흡입유량이 적기 때문에 디퓨저 날개 사이에서 재순환이 일어나기 때문으로 판단된다.

Fig. 7~Fig. 9는 각 스핀방향에서의 압력분포와 유동의 흐름을 나타낸다. Fig 5와 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 임펠러부위에서는 유체압력이 일정하게 상승하고, 디퓨저에서는 특정압력에 도달한다.

10% 스핀방향에서 디퓨저 날개간에 유동의 재순환이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이 유동의 재순환은 50% 스핀에서는 규모가 축소되고 디퓨저 후단 흡입면에 위치한다.

따라서 디퓨저의 허브 부위에서는 유로에 전체적으로 재순환이 발생하고, 슈라우드 방향으로 갈수록 임펠러로부터 유입되는 유량이 증가함에 따라 재순환영역이 디퓨저 후단으로 후퇴 및 축소할 것으로 예측된다.

위 현상은 탈설계점에서 내부유로에서 유동흐름에 지대한 영향을 끼칠 것으로 판단되며, 특히 저유량 운전시 재순환에 의한 펌프성능 저하에 주요인이 될 것으로 예측된다.

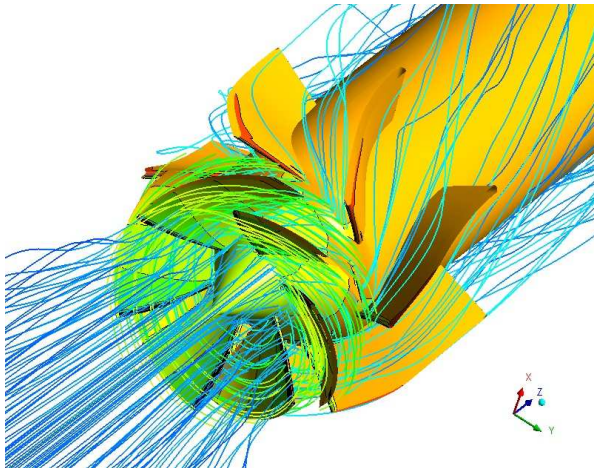


Fig. 4 Static pressure distribution and stream lines on the surface of the scaled-down model at a design point

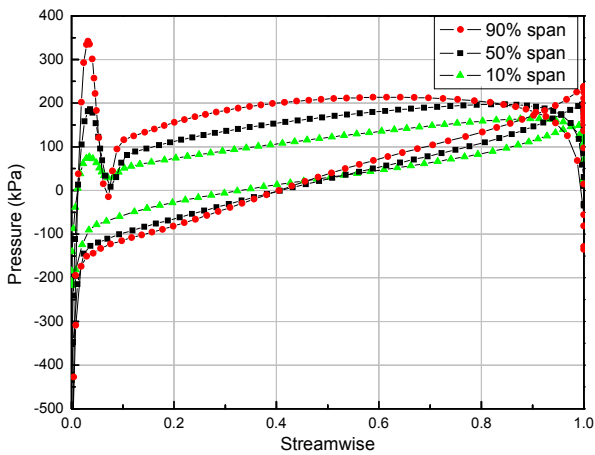


Fig. 5 Pressure distributions on the impeller at each blade span

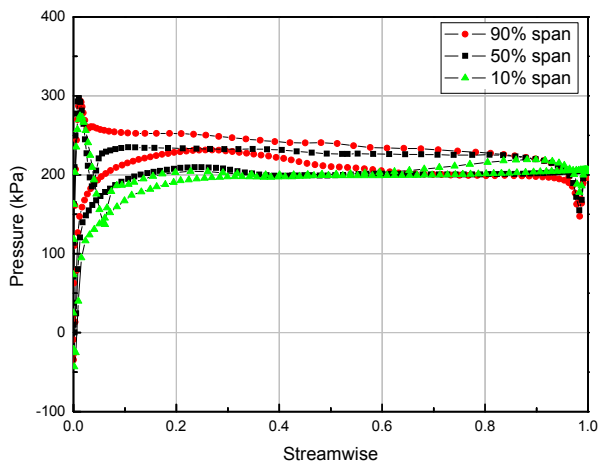


Fig. 6 Pressure distributions on the diffuser at each blade span



Fig. 7 Pressure contour and the stream lines on the 90% span of the scaled-down model at a design point

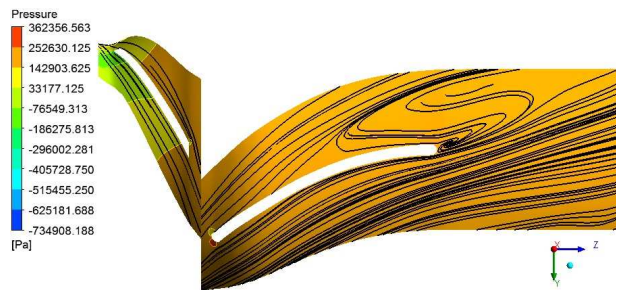


Fig. 8 Pressure contour and the stream lines on the 50% span of the scaled-down model at a design point



Fig. 9 Pressure contour and the stream lines on the 10% span of the scaled-down model at a design point

3.2 탈설계점에서의 유동해석 결과

펌프의 성능곡선을 완성하기 위하여 본 연구에서는 펌프의 회전속도는 고정시킨 채 정격유량의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 120%와 140%에 대한 각각의 경우에 대하여 해석을 실시하여 그에 해당하는 탈설계점에서의 유량변화에 따른 양정 및 펌프 효율(efficiency, η_p)과 이를 바탕으로 하는 수력학적 입력동력(break horse power, BHP)을 계산하였고 그 식들은 아래와 같다.

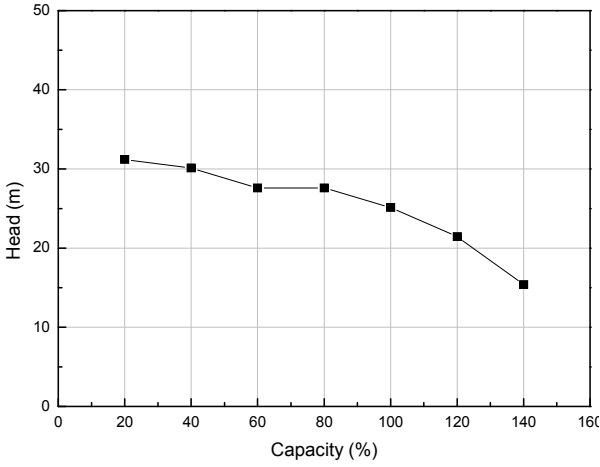


Fig. 10 Calculated head curve of the RCP under the operating pressure and temperature

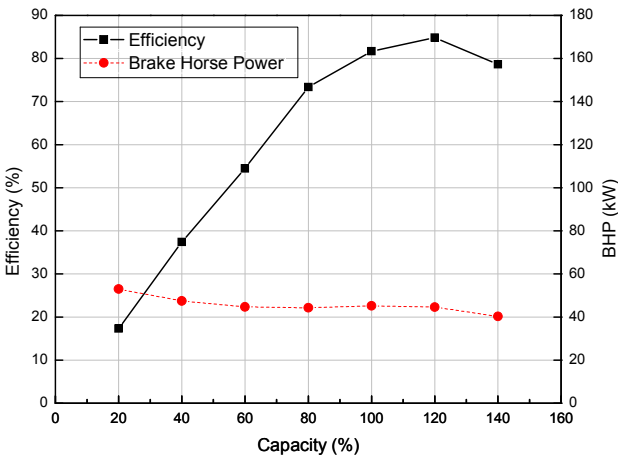


Fig. 11 Efficiency and BHP curves of the RCP under the operating pressure and temperature

$$H_p = \frac{P_{tout} - P_{tin}}{\rho g} \quad (4)$$

식 (4)에서 P_{tout} 과 P_{tin} 은 각각 출구와 입구의 전압력을 나타낸다. ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도를 나타낸다.

$$\eta_p = \frac{\rho Q g H_p}{\omega T} \quad (5)$$

식 (5)에서 η_p 는 효율, ω 는 회전속도, T 는 토크를 나타낸다.

성능곡선 Fig. 10와 Fig. 11은 식 (4)~(5)를 이용하여 산출한 그래프로 각 유량조건에 대한 축소 모형의 특성을 나타낸다. 해석결과 본 해석

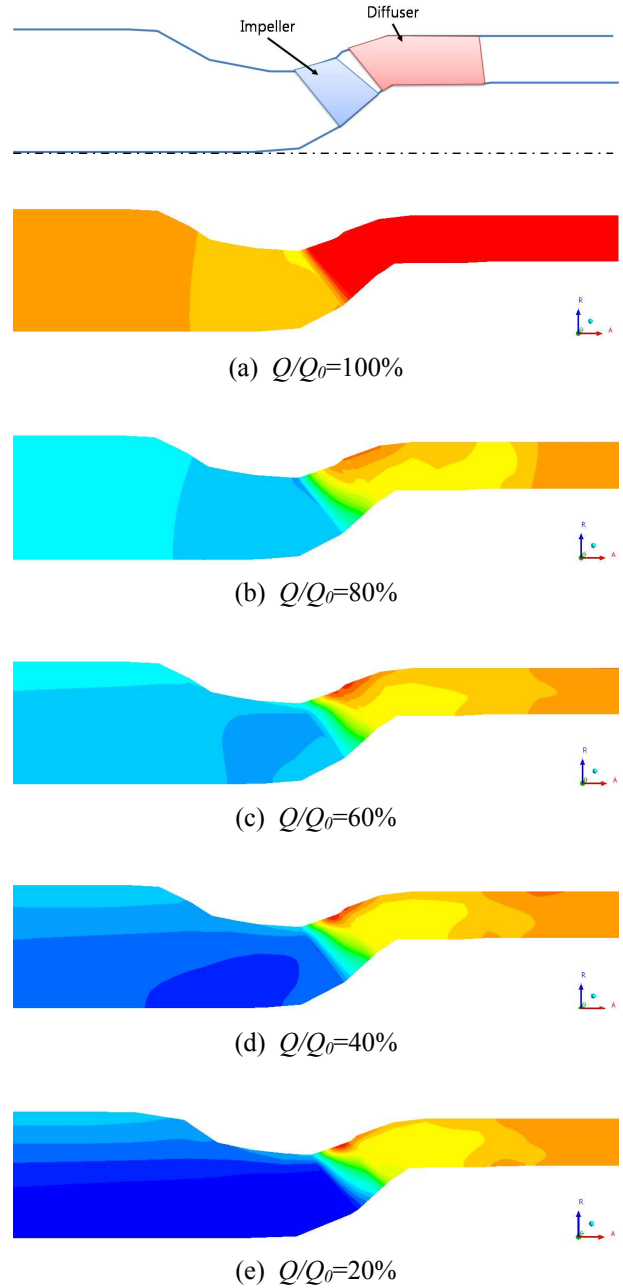


Fig. 12 Pressure contours in the meridional view

대상인 축소모형이 설계유량에서 설계대비 20% 정도 양정이 높게 나타났다. 따라서 펌프 설계시 약 20% 정도 여유를 두고 설계한 것으로 추측된다. 대부분의 펌프는 펌프성능시험 이후 임펠러 재가공을 통하여 양정을 보정하는 것이 일반적이므로⁽¹⁰⁾ 본 논문에서의 해석결과는 적절한 해석결과라 할 수 있다. 설계유량대비 120% 입구유량에서 최대효율을 나타내는 결과도 이를 뒷받침하는 해석결과이다.

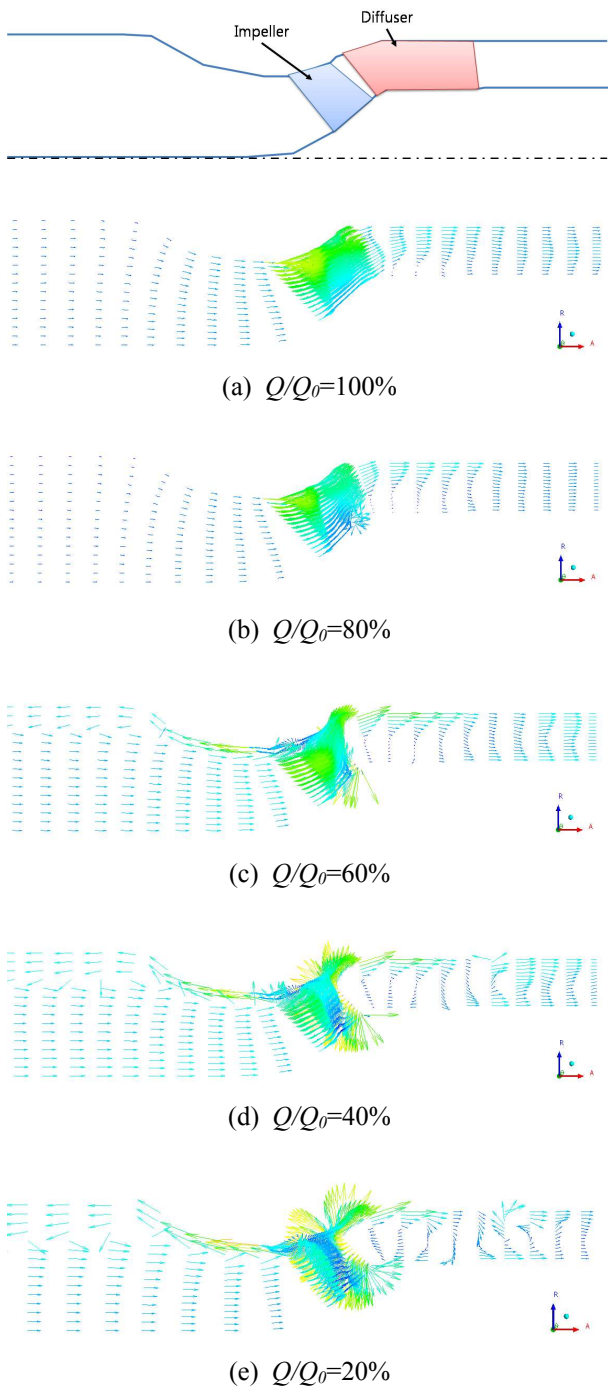


Fig. 13 Velocity vectors in the meridional view

설계유량을 기준으로 고유량에서 유체가 임펠러 및 디퓨저에서 큰 손실 없이 빠져나가는데 반하여 저유량에서는 펌프 내부의 매우 불안정한 유동박리 및 유체 유동의 재순환 등을 해석결과에서 관찰 할 수 있었다.

Fig. 12(a)는 설계유량에서의 압력분포를 나타

낸 것으로 임펠러에 의하여 상승된 압력의 분포가 디퓨저와 출구전반에 걸쳐 잘 분포된 것을 보여준다. Fig. 12(b)~(e)는 설계유량대비 80%, 60%, 40% 와 20% 유량에서 압력분포를 순서대로 나타낸 것이다. 100% 유량에서 임펠러 전체에 걸쳐 압력이 상승된 것에 반하여 저유량에서는 디퓨저에서 재순환 영역에 의하여 유체의 압력상승에 기여하는 임펠러 부위가 한정된다.

특히 해석영역의 유량이 설계유량대비 저유량으로 줄어들수록 임펠러 앞전의 끝단에서 유동압력이 입구로 확장되며, 이에 따라 입구에서 중앙 축과 슈라우드간의 압력차이가 커지는 현상이 발생하였다.

Fig. 13은 Fig. 12와 같은 압력 분포일 때 각 입력유량에 따른 속도벡터장을 나타낸다. Fig. 13(a)에서는 설계유량에서 디퓨저 허브부위를 제외하면 속도벡터장이 잘 발달한 것을 확인할 수 있다. 여기서 디퓨저의 허브 부위는 내부유로에서 재순환이 있는 부위로서 저유량으로 갈수록 재순환 영역이 슈라우드 방향으로 확장하는 것을 확인할 수 있다. 이 현상은 Fig. 13(b)~(e)와 같이 저유량조건일수록 점차 임펠러 내부유동벡터에도 영향을 준다.

또한 유입유량 감소에 따라 유체와 임펠러간에 유동박리를 야기하는 입사각 증가현상이 발생한다. 상대속도가 빠른 임펠러 끝단이 허브부위보다 입사각이 크므로 앞서 기술한 현상은 Fig. 13(c), (d)와 (e)에서 임펠러 앞전의 끝단에서 발생한다. 또한 입구유량이 감소할수록 유동박리에 의한 역류(reverse flow) 양이 커지며, 역류하는 유동의 두께도 커지는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 입사각이 작은 임펠러의 허브 부위로 유체가 유입되고 임펠러 뒷전 끝단에서 회전속도에 의하여 유체가 디퓨저로 유입되는 것을 확인할 수 있다. 앞서 기술된 역류와 재순환은 정상적인 유동의 유로를 협소화시키는 결과를 야기하며 결과적으로 저유량에서 양정의 상승을 유발하는 주요인으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SMART 원자로냉각재펌프의 축소모델에 대한 설계유량 및 탈설계점유량에서의 입구와 출구의 압력차를 이용해 양정, 효율 과

축동력을 계산하여 수력성능을 예측하였다.

해석결과 탈설계점유량에서 펌프 내부의 유동은 설계유량에서와는 달리 유동의 재순환 및 역류현상에 의한 손실이 나타났으며 이러한 현상은 저유량으로 갈수록 심해지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 해석결과를 기존 문헌들과 비교한 결과 신뢰성 있는 결과를 얻었다고 판단된다.

본 해석기법을 통하여 향후 축소모형에 대한 homologous 곡선을 생성할 기초를 완성하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Choi, K. Y., Kim, Y. S., Yi, S. J. and Baek, W. P., 2008, "Development of a Pump Performance Model for an Integral Effect Test Facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, No. 10, pp. 2614~2623.
- (2) Kim, M. W., Lee, J. S., Park, J. S., Kim, J. I. and Kim, K. K., 2003, "Computational Performance Prediction of Main Coolant Pump for the Integral Reactor SMART," *Jour. of Computational Fluids Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 32~40.
- (3) Muggli, F. A., Holbein, P. and Dupont, P., 2002, "CFD Calculation of a Mixed Flow Pump Characteristic from Shutoff to Maximum Flow," *Jour. of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp. 798~802.
- (4) Ahn, H. J., Kim, J. H. and Kim, K. Y., 2009, "Numerical Analysis of Three-Dimensional Flow in a Mixed-Flow Pump," *Spring Conference of the KSCFE*, pp. 223~226.
- (5) Yoon, E. S., Oh, H. W. and Ahn, J. W., 2003, "Design and Performance Analysis of Mixed-Flow Pumps for Waterjet Marine Propulsion," *Jour. of Fluid Machinery*, Vol. 6, No. 2, pp. 41~46.
- (6) Yoon, E. S., Oh, W. H. and Park, S. J., 2006, "Performance Evaluation of a Main Coolant Pump for Modular Nuclear Reactor by Computational Fluid Dynamics," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 8, pp. 818~824.
- (7) Wright, T., 1999, "Fluid Machinery : Performance, Analysis and Design," CRC Press., London, pp. 125~127.
- (8) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T. J., 1997, "Turbulence Modeling Validation Testing and Development," NASA Technical Memorandum 110446, Ames Research Center, California. pp. 14~16.
- (9) ANSYS, Inc., 2009, "ANSYS CFX-Solver Modeling Guide," ANSYS, Inc., Pennsylvania, pp. 331~332.
- (10) Choi, C. H., Noh, J. G., Kim, D. J., Hong, S. S. and Kim, J. H., 2006, "Performance Prediction of a Turbopump System," *Jour. of the KSAS*, Vol. 34, No. 4, pp. 70~75.