



사류펌프 내 삼차원 유동의 수치해석

안형진¹, 김진혁², 김광용^{*3}

NUMERICAL ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL FLOW IN A MIXED-FLOW PUMP

H.J. Ahn,¹ J.H. Kim² and K.Y. Kim^{*3}

This paper presents three-dimensional flow analysis for a mixed-flow pump which consists of a rotor and a stator. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with shear stress transport turbulence model are discretized by finite volume approximations and solved by the commercial CFD code CFX 11.0. Structured grid system is constructed in the computational domain, which has O-type grids near the blade surfaces and H-type grids in other regions. Validation of the numerical results was performed with experimental data for head coefficients and hydraulic efficiencies at different flow coefficients. This paper shows that the pump characteristics can be predicted effectively by numerical analysis.

Key Words : 사류펌프(Mixed-Flow Pump), 수치해석(Numerical Analysis), 양정(Head), 수력효율(Hydraulic Efficiency)

1. 서 론

터보기계 내의 유동구조는 대부분 복잡한 외류유동의 지배 하에서 작동되며, 그로 인해 실제 실험을 통하여 내부 유동장에 대한 복잡한 삼차원 유동구조 및 특성을 파악하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 문제들로 인하여 전산유체역학(CFD)은 삼차원 유동구조를 파악하고 터보기계내의 유동속도 및 압력분포 등을 예측할 수 있는 수단으로서 대두되어 왔고 컴퓨터 성능의 발전에 힘입어 CFD에 대한 의존도 또한 증가하게 되었다.

최근 들어 터보기계 중, 펌프에 대해서 체절(Shut off)점부터 대유량(Max. flow)점까지의 전반적인 성능에 대한 연구하고 캐비테이션 등의 특성을 수치 해석적으로 접근하여 파악하거나, 또는 역설계를 통해 효율을 향상시킨 사례가 학계 뿐만 아니라, 펌프 제작업체에서도 종종 발견할 수 있다[1-3].

Kim 등[4]은 축류펌프의 내부유동에 대하여 3차원 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)방정식을 이용한 수치해석을

통하여 계산결과를 실험결과와 비교하여 타당성을 입증하고 성능을 수치적으로 예측한 바 있다 Hwang 등[5]은 waterjet 추진용 사류펌프의 설계에 대하여 CFD코드에 의한 해석결과를 도입함으로써 비교적 신뢰할 결과를 얻었고, 연구결과를 통하여 최적설계, 성능해석 및 제작을 하는데 있어서 기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계제한조건을 제시하였다. 상용 CFD 코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능 해석은 Choi 등 [6]에 의해 수행되었다. 그들은 수치해석결과와 실험결과와의 좋은 일치성을 보여주었으며 또한 각각의 수치기법과 난류모델을 조합하여 평가한 결과, 임펠러의 성능을 평가하는 성능변수는 면적 적분된 값이 사용된 수치기법이나 난류모델의 영향을 거의 받지 않는다는 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 입축사류펌프 내의 내부 유동의 특성을 파악하고자 삼차원 RANS 해석을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 사류펌프 내부유동에 대한 RANS 해석결과를 실험결과와 비교하였고, 수치해석을 통한 사류펌프 내부의 유동특성을 파악하여 향후 최적설계를 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

2. 펌프의 사양

본 연구에서는 양배수용으로 사용되는 입축사류펌프 모델

1 일진전기(주) 산업기기사업부 유체기계팀

2 인하대학교 대학원 기계공학과

3 정회원, 인하대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

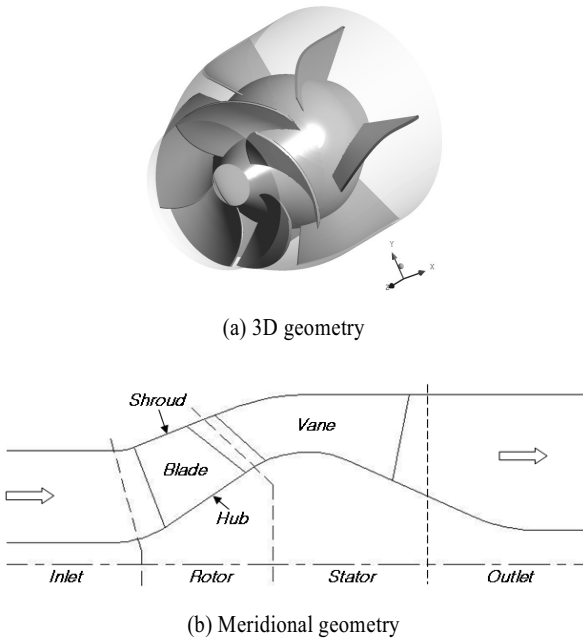


Fig. 1 Shape of the mixed-flow pump

로, 데이터의 신뢰가 높은 제품을 선정하고자 상용화되어 있는 제품 중에서 최근 4회 이상 제작되었고, 수차례의 실험에 의하여 효율 및 사양이 검증된 제품을 선정하였다. 최고효율점(Best Efficiency Point)에서의 비속도는 $N_s = N \cdot Q^{0.5} / H^{0.75} = 1099.1$ 이며, 타 제품에 비해 비교적 범용으로 사용되는 비속도 범위를 가지는 모델로서 Fig. 1에 사류펌프의 임펠러 및 디퓨저에 대한 3차원 형상과 허브, 쉬라우드, 블레이드 및 주유동 영역 등을 자오면 상으로 도시하였다. 설계점에서의 유량 및 전양정은 $568.15 \text{ m}^3/\text{min}$ 및 8.92 m 이며, 자세한 사항은 Table 1에 기술하였다.

3. 유동해석방법

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0[7]을 사용하여 사류펌프의 내부 유동장을 삼차원 정상상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 사류펌프의 형상, 격자생성, 경계조건의 정의, 유동해석 및 결과 정의는 각각 Blade-Gen, Turbo-Grid, CFX-Pre, CFX-Solver와 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.

해석대상인 사류펌프의 임펠러와 디퓨저는 각각 블레이드가 5개와 6개씩 구성이 되어있으나, 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 각각

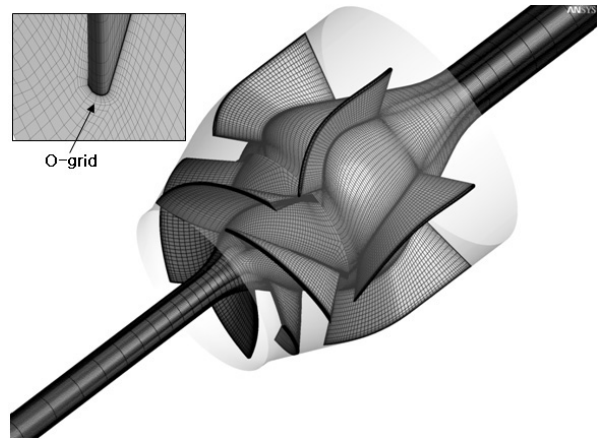


Fig. 2 Computational grids

하나의 유로에 대해서만 해석을 수행하였다. 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계, 그 외의 영역에는 H/J/C/L형 격자계를 사용하였으며, 모두 육면체 격자계로 구성하였고, 표면격자계의 형상은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

사류펌프를 통과하는 작동유체는 물로 하였고, 경계조건으로 입구조건은 균일한 상태의 대기압을 주었으며 난류강도는 5%로 설정을 하였다. 출구조건으로는 단일유로에서의 유량을 주었으며, 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 하였다. 회전하는 임펠러와 정지상태의 디퓨저 사이의 경계면은 격자면의 계산 값을 그대로 정지좌표계에 입력 값으로 사용하는 방식인 Frozen-Rotor방식을 적용하지 않고, 회전좌표계의 격자면에서 계산 값을 평균화하여 정지좌표계에 입력하는 Stage방식을 적용하였다[7].

난류모델로는 벽함수와 함께 SST(Shear Stress Transport)모델[8]을 사용하였다. 일반적으로 SST모델은 역압력구배로 인한 유동박리현상을 예측하는데 있어 다른 2-방정식 난류모델들에 비해 성능이 우수하다고 Bardina 등[9]에 의해 보고된 바 있다.

Table 1 Design specification of the mixed-flow pump

Design volume flow rate, [m ³ /min]	568.15
Rotational speed, [rpm]	238.0
Total head, [m]	8.92
Tip clearance, [mm]	1.0
Number of rotor blade (& stator vane)	5 (6)
Maximum diameter of impeller, [mm]	1799.0

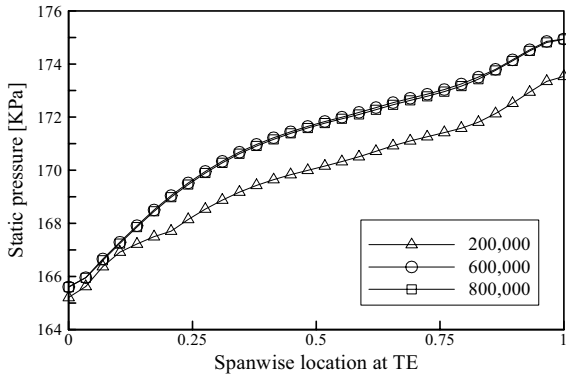


Fig. 3 Grid dependency test results

단일유로에 대하여 한번 해석 시 소요되는 시간은 약 600 번의 반 복계산을 통하여 Pentium IV 3.0GHz CPU를 사용하여 약 9시간 정도 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수치해석 결과의 검증

앞에서 기술된 사류펌프의 수치해석을 수행하기 전 단계로서 해석을 위한 최적의 격자계를 구성하고자 Fig. 3과 같이 격자의존성을 제거하기 위한 테스트는 단일유로에 대하여 총 20만개에서 80만개의 격자수 사이에서 이루어졌으며 그 결과 계산에 사용될 최적의 격자수는 총 60만개로 결정하였다.

본 연구에서의 성능시험은 Fig. 4와 같이 설치되어 수행되었으며, 펌프의 전양정(H)을 구하기 위해 펌프의 출구에서 정압을 측정하였고, 토출된 유량을 측정하여 면적에 상응하는 동압을 계산하였다. 회전속도는 동력전달 축에 광센서를 통하여 측정되었으며, 동력은 입력 전력과 사전에 시험된 모터의 효율에 의하여 계산하였다.

성능곡선 상에서의 효율적 표현을 위하여 유량계수(ϕ), 양정계수(ψ) 및 효율(η)에 대해서는 다음과 같이 무차원화 된 변수를 사용하였다[10].

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \tag{1}$$

$$\psi = \frac{gH}{N^2D^2} \tag{2}$$

$$\eta = \frac{\rho gHQ}{P} \tag{3}$$

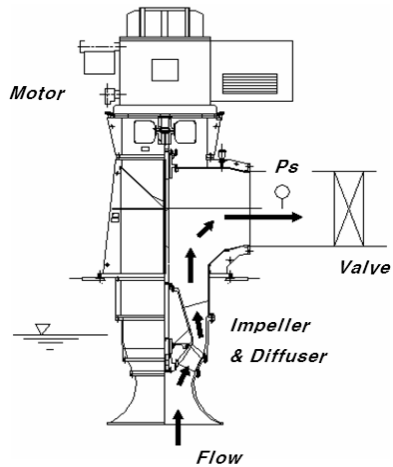


Fig. 4 Overview of test setup

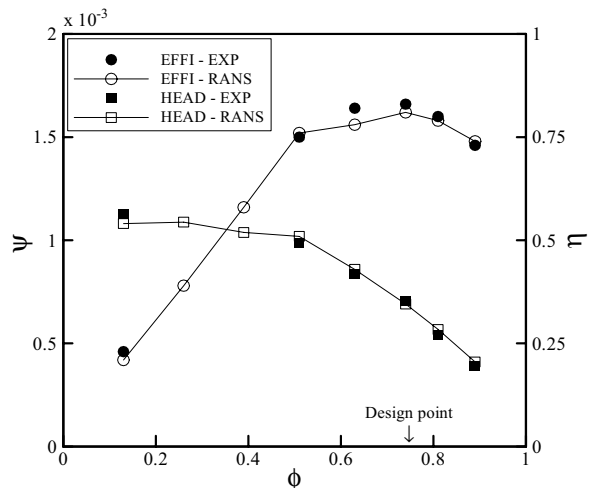


Fig. 5 CFD results validation with experimental data

여기서 Q, N, D, g, H, ρ 및 P 는 각각 유량, 회전수, 직경, 중력가속도, 전양정, 밀도 및 동력을 나타낸다

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 RANS 해석결과와 성능시험의 결과를 바탕으로 비교하였다 Fig. 5의 특성곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 각 유량계수에서 예측한 양정 및 효율은 대부분 시험결과와 잘 일치함을 보여주고 있다

4.2 설계점에서의 수치해석 결과

수치해석 결과를 토대로 설계점에서의 내부 유동장을 살펴본 결과, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 디퓨저 영역에서의 압력손실이 일부 발생하는 것으로 확인되었다. Fig. 6은 자오면 상에

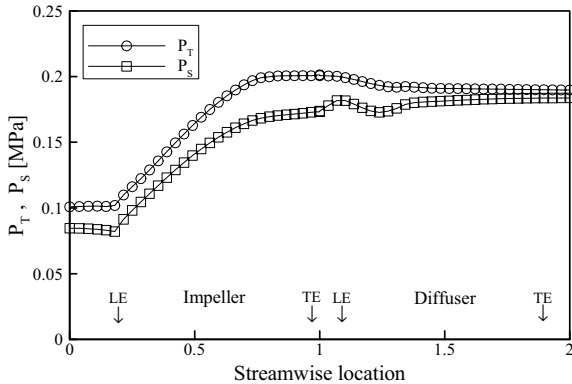


Fig. 6 Total pressure and static pressure distributions

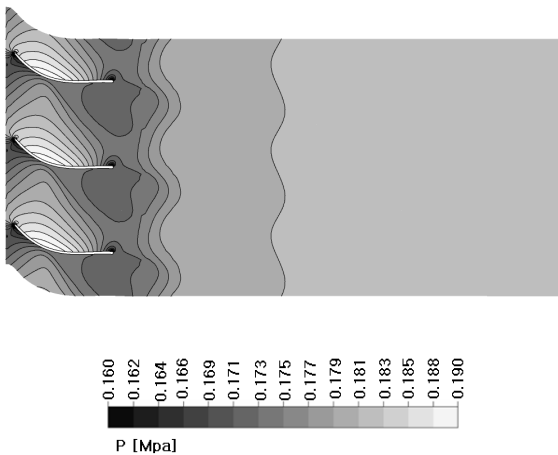


Fig. 7 Static pressure distribution at mid-span

대한 중간 스펠에서의 전압과 정압의 분포를 보여주고 있으며, 임펠러 구간에서는 정압 및 전압이 원만히 상승되는 모습을 볼 수 있으나, 디퓨저 구간의 날개 앞전 부근을 지나면서 다소 압력손실이 발생하는 것을 볼 수 있다

Fig. 7은 중간 스펠에서의 압력분포를 보여주고 있다 디퓨저 날개의 뒷전 부근의 흡입면 영역에서 압력이 다소 침체되는 구간이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 디퓨저 영역 내에서 발생하는 펌프 성능저하를 가져오는 직접적인 원인으로 보여 진다.

5. 결 론

본 연구에서는 양배수용으로 사용되는 입축사류펌프 내의 내부 유동특성을 파악하고자 삼차원 RANS 해석을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 타당성을 검증하기 위해

격자 의존성 테스트를 수행하였고, RANS 해석결과와 성능 시험의 결과를 바탕으로 비교하였다. 그 결과, 각 유량계수에서 예측한 양정 및 효율은 대부분 시험결과와 잘 일치함을 보여주었다. 설계점에서의 수치해석을 토대로 내부 유동장을 분석한 결과, 디퓨저 날개의 뒷전 부근의 흡입면 영역에서 압력이 다소 침체되는 구간이 발생하는 것을 볼 수 있었으며 이는 향후 최적설계를 통하여 성능 향상을 도모할 수 있는 주요 인자로 보여 진다. 본 연구 결과를 통하여 향후 RANS 해석과 대리모델을 결합한 최적설계를 수행할 시, 기준 사류펌프에 대한 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다

참고문헌

- [1] 2002, Muggli, F.A., Holbein, P. and Dupont, P., "CFD Calculation of a Mixed Flow Pump Characteristic From Shutoff to Maximum Flow," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.798-802.
- [2] 2008, Pouffary, B., Patella, R.F., Reboud, J.L. and Lambert, P.A., "Numerical Simulation of 3D Cavitating Flows: Analysis of Cavitation Head Drop in Turbomachinery," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.130, pp.061301-10.
- [3] 2004, Asuaje, M., Bakir, F., Kouidri, S. and Rey, R., "Inverse Design Method for Centrifugal Impellers and Comparison with Numerical Simulation Tools," *International Journal of Computational Dynamics*, Vol.18, pp.101-110.
- [4] 2001, 김민환, 김종인, 박진석, "전산유체해석을 이용한 축류펌프의 성능예측" *한국전산유체공학회지* 제6권, 제1호, pp.14-20.
- [5] 2002, 황순찬, 윤의수, 오형우, 최범석, 박무룡, 안중우, "Waterjet 선박추진용 사류펌프의 설계 및 성능해석" *2002 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp.47-53.
- [6] 2000, 최영석, 이용갑, 홍순삼, 강신형, "상용 CFD코드를 이용한 원심펌프 임펠러의 성능해석" *2000 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp.305-311.
- [7] 2006, ANSYS CFX-11.0, Ansys Inc.
- [8] 2003, Menter, F.R., Kuntz, M. and Langtry, R., "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model," *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, Inc., New York.
- [9] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T., "Turbulence Modeling Validation," *AIAA*, pp.97-2121.
- [10] 2005, 이덕형, "상사성을 이용한 model 사류펌프의 성능예측," *2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp.393-400.