

수치해석을 이용한 FPSO용 사류펌프 성능해석 연구

강경원* · 김영훈** · 김영주***† · 우남섭*** · 권재기*** · 윤명오*

A Numerical Study on the Performance Analysis of the Mixed Flow Pump for FPSO

Kyung-Won Kang*, Young-hun Kim**, Young-Ju Kim***†, Nam-Sub Woo***, Jae-Ki Kwon***, Myung-O Yoon*

Key Words : Seawater lift pump(해수펌프), Mixed flow pump(사류펌프), FPSO(부유식 원유생산설비), Total head(전양장), Pump efficiency(펌프 효율)

ABSTRACT

The seawater lift pump system is responsible for maintaining the open canal level to provide the suction flow of circulating water pump at the set point. The objective of this paper is to design a 2-stage mixed flow pump (for seawater lifting) by inverse design method and to evaluate the overall performance and the local flow fields of the pump by using a commercial CFD code. Rotating speed of the impeller is 1,750 rpm with the flow rate of 2,700 m³/h. Finite volume method with structured mesh and realized *k-ε* turbulent model is used to guaranty more accurate prediction of turbulent flow in the pump impeller. The numerical results such as static head, brake horse power and efficiency of the mixed flow pump are compared with the design data. The simulated results are good agreement with the design data less 3% error.

1. 서 론

해양플랜트산업 분야는 차세대 성장동력으로 부상하고 있으며 국내 조선업계에서도 기존 조선산업의 대체시장으로 집중하고 있다. 하지만 해양플랜트 관련 기자재 부분의 국산화율을 살펴보면 조선 분야는 90% 이상 국산화되었지만 해양플랜트 분야는 20% 수준에 머물고 있는 실정이다.

국내 조선 산업 관련 업계가 차세대 성장 동력으로 해양플랜트산업 분야에 진출하는 것은 기자재 업체도 관련시장에 함께 참여하는 것을 의미하지만, 해외의 선진업체들은 100년 이상 축적된 자체 기술력을 통하여 국제경쟁력을 확보하고 있으며, 특히 고부가가치 산업인 원전 및 해양플랜트 분야에 사용되는 펌프의 경우 효율 및 특이현상에 대한 성능이 주된 이슈로서 관련 기술력이 확보된 선진업체가 절대적으로 유리한 입장에 있는 실정이다.

해양플랜트 분야에서 요구하는 해수펌프는 우수한 성능과 내구성을 요구하며, 특히 장기 사용에 따른 높은 신뢰성이 요구되기 때문에 시장진입을 위해서는 설계 및 제작에 대한 기술력 확보뿐만 아니라 신뢰도 및 위험도 평가를 통한 선급 인증의 획득도 병행되어야 한다.

해양플랜트용 해수펌프는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 일반적으로 크게 4가지 타입으로 분류할 수 있는데, 각 타입의 펌프는 필요 유량과 양정 및 설치 조건에 따라 적합한 펌프가 적용된다. 본 연구에서는 사용빈도와 개발 가능성이 높은 것으로 조사된 수중(Submerged type) 사류펌프 개발을 목표로 선정하였다.

해수펌프 관련 연구로 국내에서 Kim 등[1]은 사류펌프의 성능향상을 위해서 임펠러 최적설계 및 디퓨저 형상 변수가 펌프 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 임펠러의 최적설계를 위하여 자오면이 고정된 상태에서 임펠러의 날개전개도에 대한 제어 변수들을 정의하였으며 고전적 설계방식과 실험계획법을 이용하여 임펠러의 최적화 연구를 수행하였는데, 디퓨저 출구부 변수보다 입구부 변수가 펌프의 성능에 많은 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

* 서울시립대학교, 재난과학과
 ** 경남대학교, 조선해양 IT 공학과
 *** 한국지질자원연구원, 광물자원연구본부
 † 교신저자, E-mail : kyjp7272@kigam.re.kr

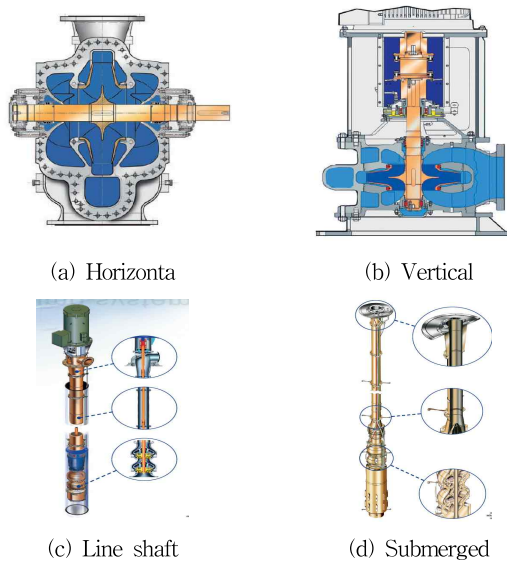


Fig. 1 Classification of seawater lift pump

Choi 등[2]은 CFD 코드를 이용하여 원심펌프 임펠러의 성능해석을 수행한 결과 임펠러의 성능을 평가하는 성능변수는 면적 적분된 값이 사용된 수치기법이나 난류모델의 영향을 거의 받지 않는다는 결과를 도출하였다. Hwang 등[3]은 Water-jet 추진용 사류펌프의 설계에 대하여 CFD 코드에 의한 해석을 통해서 최적설계, 성능해석 및 제작에 있어 기존의 산업용 사류펌프에 대한 설계 제한조건을 제시하였다.

국외 연구를 살펴보면, Manivannan[4]은 CFD를 이용하여 사류펌프 임펠러에 대한 성능분석 연구를 수행하였는데, 유량 40 m³/h 용량의 펌프에 대해서 효율, 동력을 계산하였다. 또한 성능 향상을 위해서 임펠러 형상을 변경하여 성능 변화를 예측하였는데 블레이드 두께, 쉬라우드 높이 및 직경, 베인의 입·출구 각도 등의 변화에 따른 펌프의 성능 변화를 정량적으로 분석하였다. Asuaje 등[5]은 역설계(inverse design method) 방법을 이용해서 원심펌프의 임펠러 설계와 최적화 연구를 수행하였고, CFD 해석을 통해서 설계 성능을 검증하여 역설계 방법을 이용한 원심펌프의 설계 절차를 정리한바 있다.

관련연구 분석을 통해서 선진국 대비 국내의 펌프 설계 및 개발 현황을 살펴보면, 현장에서 요구되는 성능을 발휘하는 고유 모델의 개발이 쉽지 않으며 특히 기존 선진 제품과 비교해서 양정과 효율을 동시에 향상시키는 데는 많은 어려움이 있는 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 해양플랜트 기자재 중의 하나인 해수펌프의 국산화 개발을 목표로 선진 펌프의 벤치마킹 및 모델링 기법 개발을 통해서 펌프의 성능향상 연구를 효율적으로 수행할 수 있는 방법을 제시하고, CFD 상용코드인 Fluent를 이용한 유동해석을 수행하여 펌프의 성능을 예측 및 검증하고자 한다.

또한 유동해석 결과로부터 양정, 동력 및 수력효율 등을

계산하여 펌프의 정량적인 특성을 파악하고 향후 펌프의 최적설계를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 해수펌프 패키지

FPSO(Floating Production Storage and Offloading, 부유식 원유생산저장하역설비)용 해수펌프 패키지는 FPSO에서 필요로 하는 용수를 공급하기 위한 시스템으로, 해수펌프 패키지의 주요 구성을 살펴보면 Fig. 2에 보이는 바와 같이 해수펌프, 체크밸브, 컨트롤밸브, 스트레이너 및 제어시스템 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 해석하고자 하는 해수펌프용 사류펌프는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 구성되어 있다. 해수는 펌프 하단으로 유입되어 2단으로 구성된 임펠러와 디퓨저를 지나 FPSO에 공급된다. 전형적인 수중 사류펌프는 임펠러, 디퓨저, 라이저, 축, 모터 등으로 구성되는데 모터가 펌프 임펠러의 아래쪽에 부착된다. 일반적으로 펌프의 성능은 각 구성요소의 성능에 따라 영향을 받는데, 펌프의 성능에 영향을 미

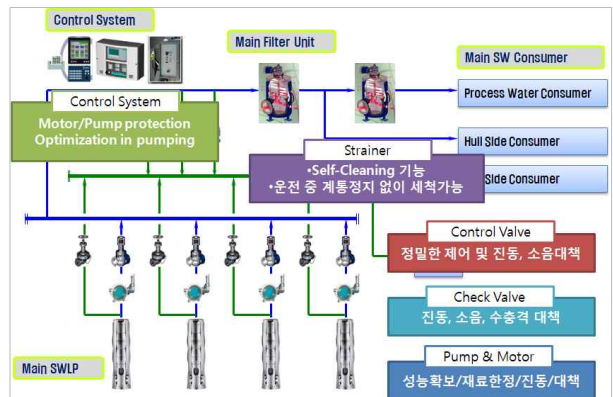


Fig. 2 Composition of seawater lift pump package

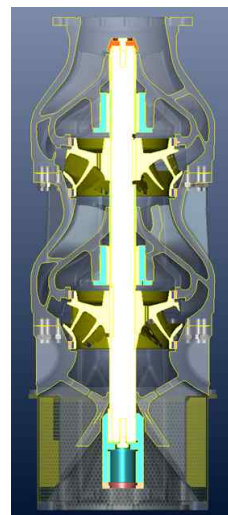


Fig. 3 Schematic view of mixed flow pump

치는 핵심 요소는 임펠러와 가이드 베인으로 이 부분을 통해서 임펠러의 기계적 에너지가 유체의 속도와 압력 에너지로 전환되기 때문이다.

해수펌프 상단에 설치되는 체크밸브와 컨트롤밸브는 진동, 소음, 수충격 및 유량조절에 대응하기 위해 설치되며 스트레이너는 해수에 포함된 각종 오염물질을 제거하는 기능을 하며 제어시스템은 펌프를 중심으로 각 부품들이 해수펌프 패키지의 최적 운전이 가능하도록 제어하는 기능을 수행한다.

3. 펌프 모델링 및 수치해석

3.1 펌프 모델링

해수펌프용 사류펌프의 개발을 위한 선행연구로 본 연구에서는 상용 외산 해수펌프 중에서 본 연구에서 개발하고자 하는 펌프의 사양과 유사한 제품을 벤치마킹 모델로 선정하여 펌프 모델링과 수치해석을 통한 성능 예측을 하였다.

벤치마킹 펌프 모델을 이용한 펌프 설계는 Fig. 4에 보이는 순서로 진행하였는데, 분해된 펌프의 내부 형상을 3D 스캐닝하여 얻어진 CAD 도면을 이용하여 펌프 형상 모델링을 하였고 이후는 CFD 해석을 위한 과정으로 진행하였다.

일반적으로 벤치마킹 모델의 3D 스캐닝된 CAD 도면을 CATIA 파일로 변환하여 CATIA에서 형상 수정 작업을 진행하는데(Fig. 5(a) 참조), 이때는 모델의 형상에 관계된 정량적 수치를 알 수 없을 뿐만 아니라 형상 수정 작업이 복잡하고 난해하여 많은 시간이 소요된다. 매번 모델링 작업을 반복적으로 수행하여야 하며 또한 각각의 경우에 대한 유동장 생성, 클린업 및 격자 생성 작업에도 많은 시간이 소요된다.

반면 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 5(b)에 보이는 바와 같이 3D 스캐닝된 CAD 도면을 ANSYS ICEM-CFD 프로그램을 이용하여 모델링하는 방법을 적용하였으며, 또한 형상 좌표값도 얻을 수 있다.

이후에는 BladeGen을 이용해서 좌표값을 불러들여 블레이드 및 유동장을 생성하였다. 따라서 다수의 블레이드 형상 변경 작업을 수월하게 진행할 수 있어 시간과 비용을 절감할 수 있다.

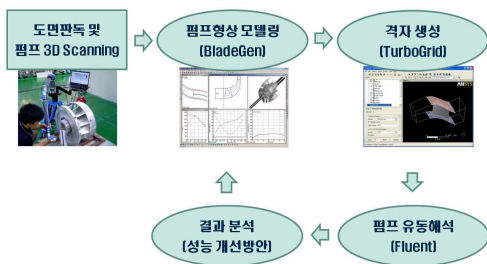
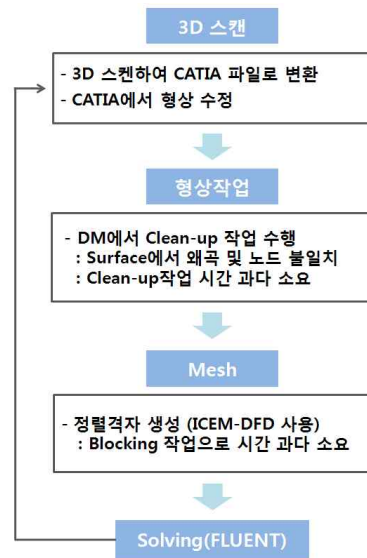
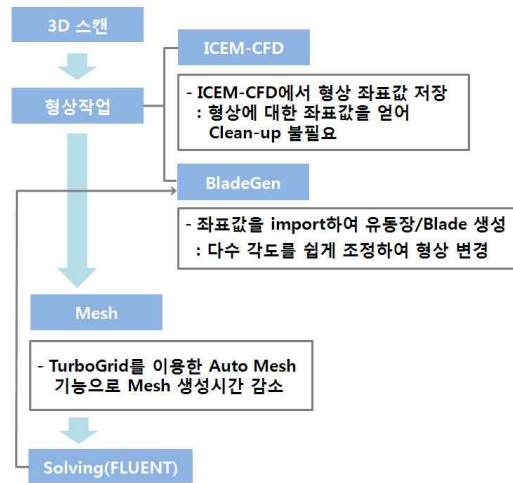


Fig. 4 Pump modeling and performance analysis process



(a) Conventional method



(b) Modified method

Fig. 5 Comparison of the modeling methods for pump blade

임펠러와 디퓨저를 포함한 사류펌프의 전체적인 형상과 허브, 쉬라우드, 블레이드 및 주 유동 영역을 Fig. 6에 도시하였다. 사류펌프는 그림에 보이는 바와 같이 2단으로 구성된 수중 펌프로 해수는 출구 방향에 대해 수직으로 유입되어 2단으로 구성된 임펠러와 디퓨저를 지나면서 가압되어 FPSO에 공급된다.

벤치마킹 모델 펌프의 1단 및 2단 임펠러는 동일한 형상으로 각각 7개의 블레이드와 9개의 디퓨저 날개로 구성되어 있으며 임펠러의 출구 직경은 350 mm이다. 사류펌프의 설계 조건과 성능 곡선을 Table 1과 Fig. 7에 정리하였다. Table 1과 Fig. 7에 보이는 바와 같이 펌프는 회전수 1,750 rpm에서 유량과 전양정은 각각 2,700 m³/h, 120 m이며 이때의 펌프 효율은 80%를 발휘하는 것으로 조사되었다.

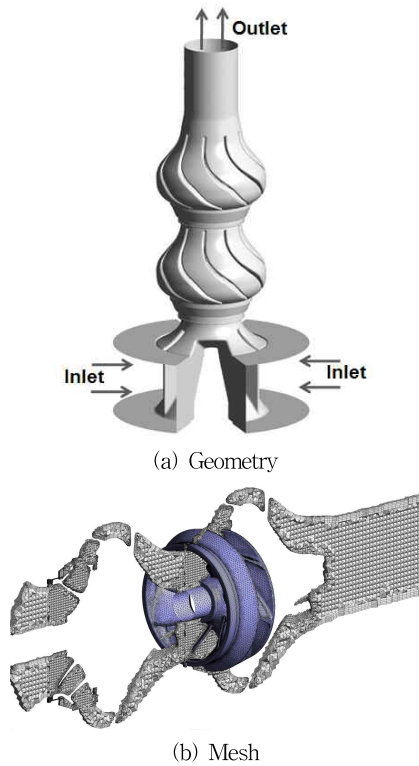


Fig. 6 Geometry and mesh of the mixed flow pump

| | |
|---------------------------------------------|-------|
| Design volume flow rate [m ³ /h] | 2,700 |
| Rotational speed [rpm] | 1,750 |
| Total head [m] | 120 |
| Pump efficiency [%] | 80 |
| Specific speed | 545 |

Table 1 Design specification of mixed flow pump

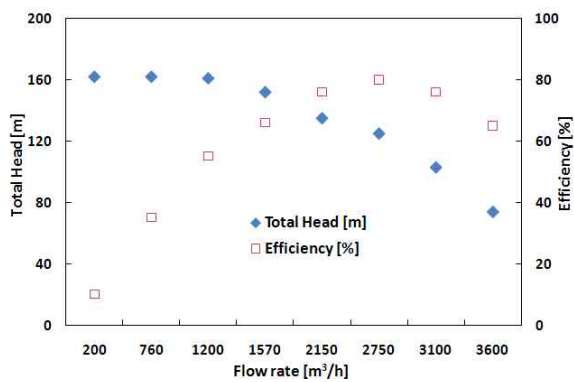


Fig. 7 Performance curves of the benchmarking pump

3.2. 수치해석

본 연구에서는 2단으로 구성된 사류펌프 내부의 유동을 비압축성 난류유동으로 가정하여 유동해석을 수행하였으며 펌프 내부에서 일어나는 3차원 유동특성을 조사하기 위해서 유한체적법과 다중 블록 계산격자를 이용하여 수치해석을

수행하였다.

사류펌프 내부의 유로에 대한 계산 격자를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 본 연구에서는 주기 조건(Periodic condition)으로 계산하는 방법과 달리 선행연구 차원에서 펌프의 전체 유동장을 대상으로 계산하였으며 주로 Hybrid(Tetra prism+Hexa) 격자를 사용하였는데 Hexa 격자는 1단과 2단 펌프 사이의 링 간극 영역에서 집중적으로 사용하였다.

계산에 사용된 격자의 수는 약 800만 개였으며, 터보기계 전용 격자 생성기인 Turbo-Grid를 사용하였다. 격자 의존성(Grid Test) 검토 결과 총 격자수가 800만 개이기 때문에 격자 절감 효과는 크게 나타나지 않았으며, 격자 절감 효과를 높이기 위해서는 펌프 모델 자체를 단순화 시키는 방법이 적절한 것으로 검토되었다.

계산의 수렴조건으로는 펌프 입·출구에서의 압력 차의 변화를 비교하여 판단하였다. 펌프 내부의 난류유동은 standard $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 해석하였으며, 지배방정식으로는 연속방정식과 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 계산하였다.

본 계산의 경우 계산 영역 내부에 회전부와 정지부를 갖고 있으므로 MRF(Multiple Reference Frame) 기법을 적용하였다. 따라서 임펠러를 포함하는 회전부의 벽은 상대좌표계에서 정지된 벽으로 처리하였으며, 디퓨저를 나타내는 정지부의 벽은 절대좌표계에서 정지된 벽으로 취급하였다. 회전부와 정지부 사이의 경계면에서는 frozen rotor로 계산하였고, 임펠러와 디퓨저의 날개 위치에 따른 계산 결과에 차이가 없었다.

작동 유체는 물이며 밀도와 점도는 각각 998.2 kg/m³, 0.001003 kg/m · s이며, 펌프 입구는 질량유량입구 조건으로 2,700 m³/h의 유량 조건을 주었으며, 펌프 출구는 압력출구 조건으로 대기압 조건을 주었다. 사류펌프 내부의 작동유체는 해수를 대신하여 물로 가정하여 계산하였는데 검토 결과 밀도와 점도 등에서 약간의 물성치 차이가 존재하지만 전체적인 해석결과에 미치는 영향은 미미한 것으로 검토되었다.

4. 해석 결과 및 고찰

사류펌프 유동장의 수치해석은 앞에서 언급한 것처럼 펌프 전체의 유동장에 대해서 계산하였기 때문에 약 800만 개의 격자가 생성되었고 따라서 128개의 CPU가 병렬로 연결된 시스템을 이용해서도 계산시간만 24시간 정도가 소요되었다. 이에 본 연구에서는 설계유량인 2,700 m³/h 한 케이스에 대한 해석 결과만 정리하였다.

해석 결과는 벤치마킹 모델 펌프의 설계 사양과 비교하였다. 먼저 설계유량에서 펌프 내부의 유동을 살펴보면(Fig. 8 참조), 펌프 입구를 통해서 흡입된 유체는 펌프의 1단 임펠러를 통과하면서 가속되지만 디퓨저를 통과하면서 속도가 감

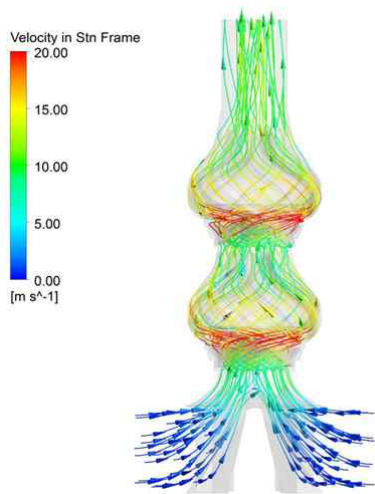


Fig. 8 Stream line in the mixed flow pump

소하고 있으며, 다시 2단 임펠러로 유입되면서 가속되어 펌프의 출구로 원활하게 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 유체가 1단 및 2단 임펠러를 통과하면서 유속은 증가, 감소가 반복되는 반면 압력은 지속적으로 상승되었다.

펌프 내부 임펠러와 디퓨저 부분에서의 속도 분포를 이용해서 자세하게 살펴보면, 임펠러 내부로 유입된 유체는 임펠러의 회전에 따라 바깥 방향으로 가속되고 있으며, 디퓨저로 유입되면서 유속이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 임펠러와 디퓨저를 포함한 유로 형상의 최적화를 통해서 유동 손실을 최소화하는 것이 펌프의 성능 향상에 매우 중요함을 확인할 수 있다.

유량 설계조건에서의 내부 유동장을 압력과 속도분포 형태로 살펴보면 유체가 펌프 흡입구에서 1단 및 2단 펌프를 통과하면서 압력이 상승하여 2단 임펠러의 출구 부분에서는 펌프 입구를 기준으로 약 1.25 MPa 이상 상승하였다. 반면 임펠러의 링 간극(0.5 mm) 사이로 일부 압력손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

실제 펌프를 제작하게 되면 임펠러의 링 간극의 크기가 펌프의 성능에 큰 영향을 미치게 되는데 진동과 편심 등의 문제로 링 간극의 최적화가 중요한 기술인 것으로 알려지고 있다. 따라서 수치해석을 통해서 계산된 펌프의 성능은 실제 펌프에 비해서 높게 나올 것으로 예상되므로 성능향상 연구 시 이 부분을 고려하여 성능향상 목표가 설정되어야 할 것이다.

2단 임펠러와 디퓨저에서 속도 벡터 분포를 살펴보면 (Fig. 9 참조), 전체적으로 정체영역이나 재순환영역 없이 유동이 매끄럽게 흘러가는 것을 볼 수 있다. 펌프의 설계유량 전·후의 저유량 및 고유량 영역을 좀 더 살펴볼 필요가 있지만, 본 논문에서의 유량 조건에서는 임펠러 입구에서 최적 입사각이 어긋나거나 디퓨저의 최적화가 이루어지지 않는 이유로 유동의 불안정성이 발생되어 특정 영역에서 유동

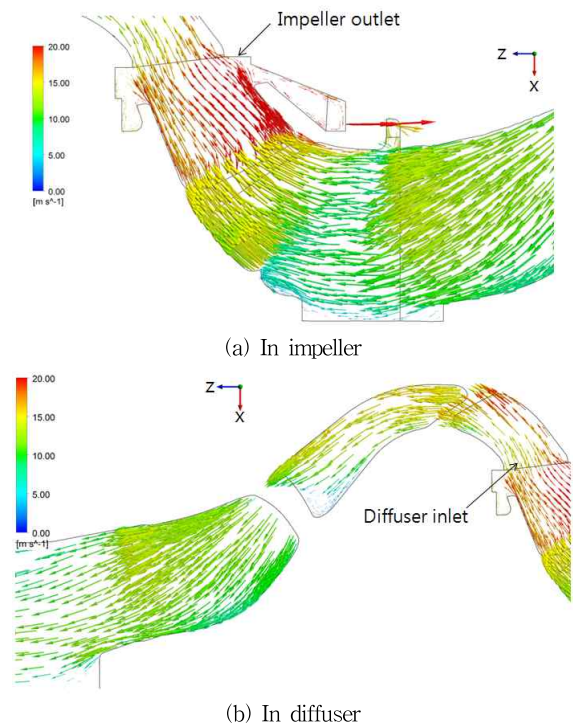


Fig. 9 Velocity profile in the 2nd impeller and diffuser

의 재순환이 발생하는 등의 문제는 없는 것으로 판단된다.

또한 작은 유량이지만 임펠러의 링 간극을 통해서 일부 유체가 빠른 속도로 빠져 나가는 것을 볼 수 있는데 계산 조건인 0.5 mm의 링 간극에서는 펌프의 설계 성능이 만족되는 것으로 계산되었다. 하지만 링 간극이 커지게 되면 펌프의 성능이 급격하게 저하된다. 계산 초기에 실수로 두께 1 cm의 임펠러 링을 빼고 계산을 하였는데, 양정이 72 m로 계산되어 설계 양정의 60% 밖에 성능이 달성되지 못하는 것을 확인하였다.

결과적으로 수중 해수펌프의 설계 조건과 비교해서 수치 해석을 통해서 도출된 사류펌프의 성능을 계산해 보면, 펌프의 설계유량 2,700 m³/h 및 임펠러 회전수 1,750 rpm 조건에서 펌프의 양정은 118.9 m로 계산되었으며 토크는 1단 임펠러에서 3,045 Nm, 2단 임펠러에서 2,924 Nm로 계산되어 총 5,969 Nm이었으며 이때의 소요동력은 1,092 kW로 계산되어 펌프의 효율은 79%인 것으로 예측되어 펌프의 설계 조건에 근접한 결과를 얻었다.

5. 결 론

본 연구는 해양플랜트 기자재인 해수펌프 개발 연구의 일환으로 향후 성능 향상 연구를 효율적으로 진행할 수 있는 임펠러 모델링 방법 적용과 수치해석을 이용해서 모델링된 사류펌프 내부의 유동 해석을 수행하였다.

유동해석 결과로부터 펌프 내부의 유동 특성을 파악하였

고 설계 유량에서의 양정, 소비동력 및 수력효율 등을 계산하여 펌프의 정량적인 특성을 파악하였으며 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

펌프 내부의 유동을 살펴보면 전체적으로 정체영역이나 재순환영역 없이 유동이 매끄럽게 흘러가는 것을 볼 수 있다. 이는 임펠러 입구에서 최적 입사각이 어긋나거나 디퓨저의 최적화가 이루어지지 않는 이유로 유동의 불안정성이 발생되어 특정 영역에서 유동의 재순환이 발생하는 등의 문제는 없는 것으로 판단되었다.

펌프의 설계 조건인 유량 2,700 m³/h 및 임펠러 회전수 1,750 rpm에서 펌프의 양정은 118.9 m로 계산되었으며 토크는 5,969 Nm, 이때의 소요동력은 1,092 kW로 계산되어 펌프의 효율은 79%인 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 동남 광역경제권 선도산업 기술개발사업의 ‘심정용 해수 펌프 개발 (11-9214)’ 과제에서 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) S. Kim, Y. S. Choi, K. Y. Lee, 2009, "Blade Shape Design of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers In a Fixed Meridional Geometry," Summer Proceeding of the SAREK, pp. 1203~1208.
- (2) Y. S. Choi, K. Y. Lee, J. H. Kim, S. Kim, 2008, "Optimal Design of the Impeller and Diffuser of the Mixed Flow Pump," Proceeding of the Fluid Machinery, pp. 57~62.
- (3) S. C. Hwang, E. S. Yoon, H. W. Oh, B. S. Choi, M. R. Park, J. W. Ahn, 2002, "Design and Performance Analysis of Mixed-Flow Pump for Waterjet Marine Propulsion," Proceeding of the Fluid Machinery, pp. 47~53.
- (4) Manivannan, A., 2010, "Computational fluid dynamics analysis of a mixed flow pump impeller," International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 2, No. 6, pp. 200~206.
- (5) Asuaje, M., Bakir, F., Kouidri, S., and Rey, R., 2004, "Inverse Design Method for Centrifugal Impeller and Comparison with Numerical Simulation Tool," International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 18, No. 2, pp. 101~107.