

축류형 펌프 성능해석을 위한 foam-Extend 소프트웨어 검토

이형진* · 최병열*† · 최동훈*

Performance Validation of Axial-flow Pump Analysis with Foam-Extend Software

Hyeong-Jin Lee*, Byung-Lyul Choi*†, Dong-Hoon Choi*

Key Words : Open-source software(오픈소스 소프트웨어), Axial-flow pump(축류형 펌프), Performance validation(성능 검토), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

ABSTRACT

In this paper, flow analysis of the open-source based hydraulic performance evaluation and its validation of axial-flow pump are proceeded using the foam-Extend and Ansys CFX, which one is open-source solver and other one is commercial solver. To check validity of the open-source mesh generator, the cf-Mesh which can construct hex-dominant mesh is selected as unstructured mesh generator and the TurboGrid is selected as the counterpart. There are three cases to compare the performance result of the open-source solver, which is called as the CFX with TurboGrid, the foam-Extend with TurboGrid, and foam-Extend with cf-Mesh. by the performance comparing and flow structure analysis, the flow nearby IGV and Impeller is slightly different but can be accepted. However, nearby the diffuser vane, the foam-Extend with TurboGrid case cannot predict the separation nearby the trailing edge. Because of the differences of flow contour and performances are acceptable, the foam-Extend can be selected as flow analysis program of axial-flow pump with well-defined flow interfaces.

1. 서 론

펌프는 임펠러의 회전력을 이용하여 유체에 힘을 전달하고, 이를 양정의 형태로 저장하는 유체기계의 일종으로, 물 등의 액체를 작동유체로 갖는다. 그 중에서도 축류 펌프는 높은 양정을 필요로 하지 않으면서 많은 유량을 운반할 수 있는 펌프의 일종으로써, 해수 이송, 냉각수 공급, 수력 발전 등 다양한 산업 분야에 활용된다. 이러한 펌프의 설계 및 성능 평가는 전통적으로 실험을 통하여 진행되었는데, 이러한 실험의 비용 등의 이슈로 인하여 터보기계 영역에서도 전산 유체역학을 이용한 성능 예측 및 설계 검증 연구가 활발히 수행되고 있다. Nguyen 등⁽¹⁾은 터보기계 형상의 최적화를 진행하고 이에 대한 실험과 전산유체역학 해석 결과를 비교한 바 있으며, 상호 간 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다. 이러한 전산유체역학 해석의 경우 실험에 비하여 적은 비용으로 유사한 결과를 획득할 수 있어 높은 활용도를 갖는다.

전산유체역학 해석은 통상적으로 상용 프로그램 기반으로 진행하게 되는데, 상용 프로그램은 사용이 편리하다는 장점을 지니나, 비싼 라이선스 비용 등에 의하여 중소중견 기업에서의 활용은 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 오픈소스 소프트웨어인 OpenFOAM⁽²⁾의 일종인 foam-Extend⁽³⁾를 활용하여 펌프의 성능을 평가하였다. Fahlbeck 등⁽⁴⁾은 foam-Extend와 OpenFOAM을 이용하여 엠티전 펌프-터빈 성능을 평가한 바 있으며, Romain 등⁽⁵⁾ foam-Extend를 이용한 Rotor-stator interaction을 평가한 바 있다. 이외에도 OpenFOAM 등의 오픈 소스를 이용하여 터보기계의 유동해석을 진행하는 사례들이 확인되고 있으며⁽⁶⁻⁸⁾, 국내에서도 Kang 등⁽⁹⁾이 foam-Extend를 이용하여 가스터빈의 해석을 진행하는 등의 사례를 확인할 수 있다. 이러한 연구들은 주로 설계된 유체기계의 성능 평가를 진행하였으며, 정해진 방법에 의하여 구성된 정렬격자를 이용하였다는 한계를 갖는다. 반면, 유체

* (주) 피도텍(PIDOTECH Inc.)

† 교신저자, E-mail : blchoi@pidotech.com

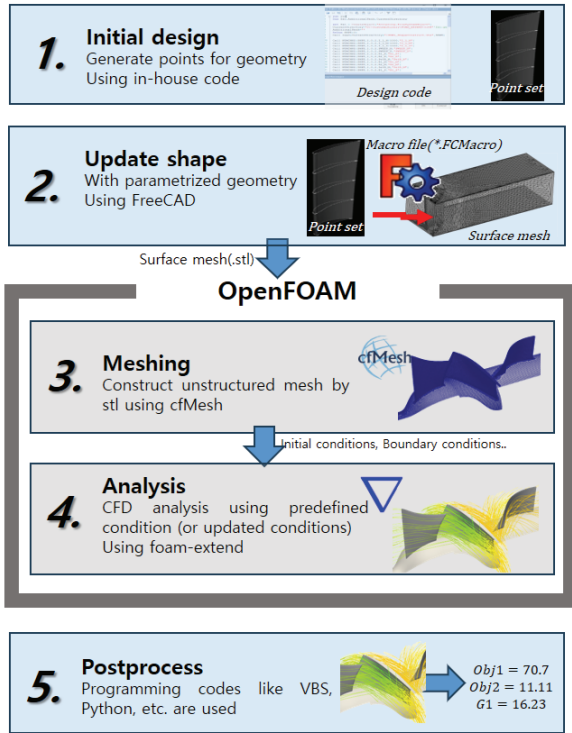


Fig. 1 Flow analysis process of Axial-flow pump

기계 뿐 아니라 보편적으로 쓰이는 비정렬격자를 이용한 해석자 검증 및 성능 평가에 대한 연구는 부족한 실정이며, 이는 오픈소스 소프트웨어의 실용성 및 일반화에 큰 장애물이 되는 실정이다. 이러한 실정에 대한 해결책의 일환으로, 본 연구에서는 foam-extend를 통하여 축류형 펌프의 성능을 해석하고, 정렬격자 기반 해석 결과와 비정렬격자 기반 해석 결과를 비교함으로써 foam-extend에서의 비정렬격자 해석에 대한 유효성을 검토하고자 한다. foam-Extend는 터보기계 해석에 특화된 OpenFOAM 해석 프로그램으로써, 여타 오픈소스 프로그램들에 비하여 터보기계 해석에 특화되었으며 별도의 소스 코드 수정 없이 GGI, Mixing plane 등의 경계조건을 적용할 수 있어 오픈 소스를 이용한 터보기계 해석에 주로 사용된다. 또한 해석자의 정확성에 대한 검증을 위하여 상용 프로그램인 Ansys CFX⁽⁹⁾ 결과와의 성능 및 유동장 비교를 진행하여 해석의 신뢰성을 확보하고, 이후 축류형 펌프의 설계 개선을 꾀하고자 하였다.

Fig. 1에는 foam-Extend를 이용한 유동해석 절차가 도시되어 있다. 형상 도시를 위하여 In-house 코드 및 FreeCAD로 형상 도시 및 표면격자를 구성하였고, cfMesh를 이용하여 3차원 격자를 구성, foam-Extend를 통하여 유동해석을 진행하여 성능을 평가하였다.

2. 펌프 형상

Fig. 2에는 본 연구의 성능 평가의 대상인 축류형 펌프의

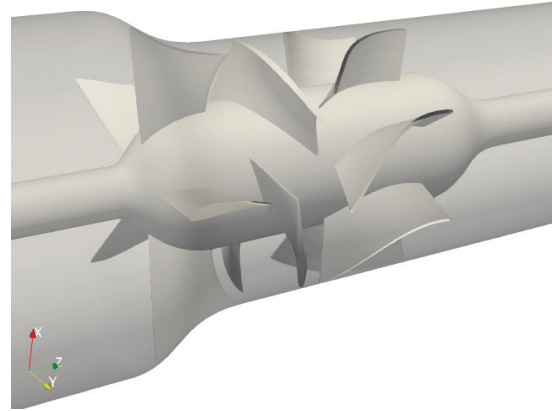


Fig. 2 Computational domain of axial flow pump

Table 1 Design specification of axial pump

	Q(CMM)	Ht(m)	n(RPM)	P(kW)	Ns
Pump	7	10	2,560	15.6	1207

형상이 도시되어 있다. 통상적인 축류형 펌프와 같이 유동의 예선회를 돕는 입구 안내깃(Inlet Guide Vane, IGV)과, 회전력을 통하여 유체에 힘을 전달하는 임펠러(Impeller, IMP), 그리고 유동을 축방향으로 재정렬해주는 디퓨저 베인(Diffuser Vane)으로 구성된다. 입구 안내깃이 위치하는 영역에는 벨마우스 형상(Bell-mouth shape)을 통하여 유동을 가속시켜 손실을 줄이고, 디퓨저 베인의 후방에는 회전축 형상의 모사를 위하여 허브 반경을 연속적으로 축소한 형상을 삽입하였다. 본 연구에서는 입구 안내깃과 임펠러, 디퓨저 베인의 영역에 대하여 개별적으로 격자를 구성, 이후 하나의 도메인으로 통일하는 일련의 절차를 통하여 축류형 펌프의 형상을 모사하였다.

Table 1에는 해석 대상인 축류형 펌프의 운용 조건이 제시되어 있는데, 비속도는 약 1207로 축류형 운용 조건에 잘 맞음을 확인하였다.

3. 수치해석 기법

본 연구에서는 수치해석을 위하여 오픈 소스 소프트웨어인 OpenFOAM을 이용하였다. 다음 Table 2에는 OpenFOAM 종류별 터보기계 해석에 필요한 기능의 구현 여부가 표현되어 있다. 이 중에서 다중 참조 프레임(Multiple Reference Frame)이 구현되어 있으며 비용의 저감을 위하여 혼합면 기법(Mixing plane)의 적용이 가능한 foam-Extend의 4.1 버전을 사용하였다. 사용 솔버로는 압축성 효과와 캐비테이션(Cavitation)을 고려하지 않고 해석을 진행하는 MRFSimpleFoam을 채택하였다. 난류모델의 지배방정식으로는 비용이 비교적 저렴한 레이놀즈-평균 시뮬레이션(Reynolds Averaged Simulation, RAS)을 선정하여 레이놀

Table 2 Libraries of OpenFOAM to analyze axial-flow pump

	Foundation	ESI	foam-Extend
Periodic	O (cyclicAMI)	O (cyclicAMI)	O (cyclicGgi)
Frozenrotor	O (cyclicAMI)	O (cyclicAMI)	O (overlapGgi)
Mixingplane	X	X	O (mixingPlane)
Incompressible MRF	O (Simple)	O (Simple)	O (MRFSimple)

즈 응력의 이방성은 존재하지 않는다 가정하였다. 벽면 주위 및 팁 사이 유동의 모사를 위하여 2계 난류모델을 채택하였고, 벽면 주위에서의 유동 모사 및 박리 현상에 대한 평가를 위하여 SST $k-\omega$ 난류모델⁽¹¹⁾을 이용하였다.

3.1 격자 구성 기법

유동해석을 위한 격자는 cfMesh⁽¹²⁾를 이용한 비정렬격자로 구성되었다. cfMesh는 foam-Extend 등 일부 OpenFOAM 버전에 내장된 격자구성 프로그램으로, OpenFOAM의 또 다른 격자 프로그램인 snappyHexMesh에 비하여 격자 품질 자체는 높지 않지만 격자의 구성이 신속하게 이루어지며 경계층(Boundary layer) 모사에서의 강건성을 강점으로 갖는다. 본 연구에서는 cfMesh의 격자 구성 기법들 중에서 육면체 기반(Hex-dominant) 격자 구성 기법인 cartesianMesh를 이용하였다. cfMesh 등에서 이용되는 격자 구성 기법은 정해진 로직을 통하여 정렬된 격자를 구성하는 TurboGrid나 주어진 형상에서 표면격자를 생성 후 이를 기반으로 3차원 격자를 구성하는 여타 상용 프로그램과 달리 기 구성된 표면 격자를 기반으로 격자 구성의 대상이 되는 내부 형상을 판별하고 3차원 격자를 구성 후, 경계층 등 세부적인 격자의 구성을 진행하는 방식으로 진행된다. cfMesh는 정렬격자계 대비 팁 간극 등의 구현에 비용이 다소 많이 들고 격자 사이즈 변경이 불연속적이라는 단점을 지니고 있지만, 격자 구성 속도가 빠르고 원하는 영역에 격자를 집중시킬 수 있으며, 정렬격자에 비하여 형상 변경에 강건하여 최적설계 등 형상변경을 필요로 하는 해석을 진행할 때 유리하다. 본 연구에서는 소프트웨어의 비용 절감 뿐 아니라 오픈소스 소프트웨어 평가를 통하여 이후 최적설계 과정에 적용하고자 하여 격자 구성 프로그램으로 cfMesh를 선택하였다.

다음 Fig. 3에는 cfMesh를 이용하여 구성한 격자의 벽면 형상이 제시되어 있다. 각 블레이드의 선단부 및 끝단부의 형상 모사를 위하여 격자를 조밀하게 구성하였으며, 임펠러의 슈라우드 팁 간극 모사를 위하여 팁 부근에서의 격자를 보다 더 조밀하게 모사하였다. 이와 같이 생성된 격자는 총 2,206,510개의 셀(Cell)을 갖으며, 특히 임펠러에서의 팁 간

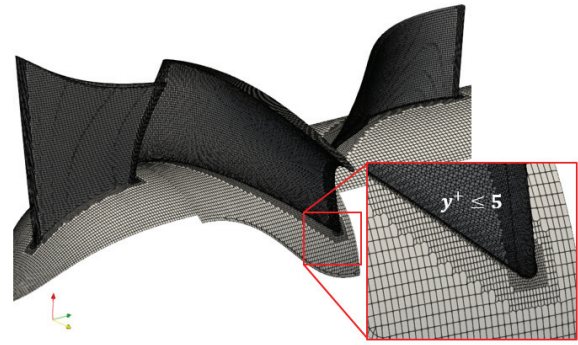


Fig. 3 Grid system of rotor region using cfMesh

Table 3 Grid convergence index for the grid dependency test

	Total Efficiency	Total head	Power[kW]
N ₁	2,206,510		
N ₂	1,355,593		
N ₃	766,031		
r ₂₁	1.176		
r ₃₂	1.210		
Φ ₁	80.448	12.840	18.154
Φ ₂	80.216	12.843	18.212
Φ ₃	79.729	12.865	18.353
ε ₂₁	-0.232	-0.004	-0.058
ε ₃₂	-0.487	-0.021	-0.142
Apparent order, p	3.274	8.758	4.132
φ ₂₁ ^{ext}	80.779	12.838	18.093
e ₂₁ ^a	2.9e-3	2.9e-4	3.2e-3
e ₂₁ ^{ext}	4.1e-3	9.3e-5	3.3e-3
GCI ₂₁ ^{fine}	5.1e-3	1.2e-4	4.2e-3

극 모사에 의하여 임펠러 부분에 807,908개의 셀이 집중되었다. 벽면의 y^+ 는 최대 5 수준으로 유지하였고, 또한 비용 저감에 필요한 주기조건 모사를 위하여 입구 안내깃 5개, 임펠러 4개, 디퓨저 베인 7개의 블레이드 중 각각 하나씩만을 이용하여 격자를 구성하였다.

해석 결과들에 대한 격자 조밀도의 영향성을 평가하기 위하여, 격자 수렴성 지표(Grid Convergence Index)⁽¹³⁾를 측정하였고, 이에 대한 결과가 Table 3에 제시되어 있다. 각 격자계에서 셀의 조밀도에 해당하는 평균 격자 사이즈(r)가 약 1.2배 가량을 유지하도록 격자계를 구성하였고, 그 결과가 가장 성긴 격자에서 약 77만, 중간 수준 격자에서 약 136만, 본 연구에 사용된 격자에서 약 221만 개의 셀을 갖는다. 격자 수렴성 지표는 세 수준의 격자에서의 성능값을 이용하여 격자 조밀도와 성능지수에 대한 회귀 다항식을 구성하고, 이 다항식의 차수가 높은 값을 가질수록 격자 독립성이 잘 확보되었다고 판단한다. 본 연구에서는 양정에는 격자 수렴성 지표가 1.2×10^{-4} 수준으로 격자 독립성이 매우 잘 확보되었으

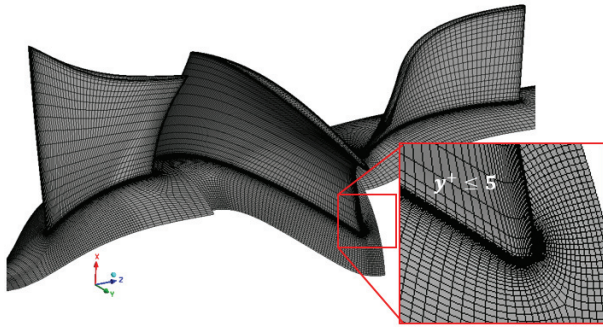


Fig. 4 Grid system of rotor region using TurboGrid

며, 효율과 축동력 또한 5×10^{-3} 수준으로 충분히 확보되었음을 확인하였다.

Fig. 4에는 대조균인 TurboGrid를 이용하여 구성된 격자의 벽면 형상이 제시되어 있다. 팁 간극의 모사는 별도의 인터페이스를 사용하지 않고 각 셀들을 연속적으로 이어주는 연속 팁(Conformal Tip) 기법을 사용하였다. 이와 같이 생성된 격자는 2,010,719개의 셀을 갖고, 임펠러 부분에는 868,655개의 셀을 위치시켜 cfMesh를 이용하여 구성된 격자와 유사하게 설정하였다. 경계면 또한 cfMesh와 유사하게 최대 y^+ 를 5 수준으로 유지한 격자를 구성하였다. 이를 통하여 SST 난류 모델의 벽함수를 일괄적으로 사용하지 않도록 하였다. Fig. 3의 벽면격자와 비교하여 정렬격자 기반이라는 특성 상 각 면의 격자 사이즈 변화가 비교적 매끄럽게 이어짐을 확인 가능하며, cfMesh의 격자에 비하여 곡면을 부드럽게 모사함을 확인할 수 있다. 그러나 cfMesh와 같이 원하는 영역에 격자를 집중시키는 등의 기법의 채택은 어려우며, 특정 영역에서 높은 격자 조밀도를 필요로 할 경우 전체 영역에서 조밀한 격자를 구성함으로써 목표로 하는 영역의 격자를 집중하는 기법을 사용하지 못한다는 한계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 이유와 함께 터보기계 영역에서의 비정렬격자 기반 오픈 소스 격자 구성 프로세스의 유효성을 검토하기 위하여 cfMesh와 TurboGrid의 두 가지 프로그램을 이용하여 격자를 구성하였다.

3.2 경계조건

Fig. 4에는 격자를 이루는 각 경계면들에 적용된 경계 조건들이 제시되어 있다. 임펠러와 허브, 슈라우드 등 벽면에 해당하는 영역은 점착조건을 갖는 벽면(No-slip wall) 경계조건을 가지며 형상 반복면의 경우 회전 주기조건(rotational periodic)에 해당하는 cyclicGGI 조건을 주었다. cyclicGGI는 foam-Extend 내에서 적용할 수 있는 주기조건의 일종으로, 주기 조건으로 묶이는 두 면의 표면격자 형태의 완전일치 조건을 불만족하는 경우 채택되는 조건이다. 격자점의 정보를 그대로 교환하는 cyclic과는 달리 경계

면 불일치 해소를 위한 보간을 진행 후 정보 교환을 진행하는 방식으로 cyclic에 비해서 데이터의 왜곡이 다소 발생할 수 있다. 고정자와 회전자의 블레이드 수의 불일치를 해소하기 위하여 임펠러 전단, 후단의 비등각 격자(nonconformal mesh) 전후 물성치 전달은 동일 반경에서의 물성치를 평균하여 다음 영역으로 전달하는 혼합면 기법을 이용하였다. 이러한 혼합면 기법은 해석의 비용을 줄이는 데에는 효율적이거나, LES 등 높은 정확도를 갖는 해석에서는 데이터의 왜곡에 의하여 추천되지는 않는 기법이다. 본 연구에서는 합리적인 비용으로 주어진 조건에서의 성능을 획득하고 추후 설계의 개선을 진행하는 것을 목적으로 하였으므로, 이러한 데이터 왜곡을 감안하고 해석 비용을 절감하는 방향으로 해석을 진행하였다.

슈라우드 팁 주위에서는 팁 누설(Tip leakage)을 보다 잘 모사하기 위하여 격자를 집중하였으며, 정렬 격자 구성 시와는 달리 해당 부분은 모두 등각 격자(Conformal mesh)로 구성하여 별도의 경계 조건을 두지 않고 내부 영역으로 처리하였다. 이와 함께 실제 회전하지 않는 영역인 임펠러의 슈라우드 영역은 비회전 벽면(Non-rotating wall)로 설정하여 벽면의 상대 속도가 적용되지 않도록 설정하였다. 압축성 효과가 무시되는 해석에서 보편적으로 선택되는 입구 속도-출구압력 조건(Velocity-inlet and Pressure outlet condition)을 적용하여 해석의 안정성을 확보하였으며, 입구 영역의 속도는 유량을 기반으로 별도 계산된 값을 적용하였고 출구 영역의 압력은 기준압력인 0으로 설정하였다.

3.3 해석자 정보

본 연구에서는 정상상태 비압축성 해석자의 일종인 MRFSimpleFoam을 해석자로 채택하였다. MRFSimpleFoam은 simpleFoam의 일종으로, 압력의 계산에는 해석자의 이름과 같이 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 기법을 사용하였다. SIMPLE 기법은 Patankar 등⁽¹⁴⁾이 개발한 반 음해법으로, 속도 구배와 압력 구배를 기반으로 압력과 속도를 순차적으로 계산하는 이산 알고리즘(Segregated algorithm)의 일종이다. 본 연구에서 사용된 MRFSimpleFoam은 이러한 simpleFoam에 터보기계 해석에 적합하도록 다중 참조 프레임 기법을 적용할 수 있는 라이브러리를 추가한 해석자이며, 다중 참조 프레임 기능이 simpleFoam에 통합되어 있는 여타 OpenFOAM 버전들과 달리 foam-Extend에서는 MRFSimpleFoam으로 분리되어 있다. MRFSimpleFoam 또한 여타 SimpleFoam 계열 솔버들과 같이 비압축성 가정으로 인하여 압력의 계산 시 압력값 P 대신 밀도에 대하여 정규화된 P/ρ 를 이용하여 계산하며, 별도의 밀도 값은 입력하여 주지 않는다. 이후 축동력 계산 등 후처리 과정 진행 시 사전 정의된 밀도값을 이용하여야

Table 4 Comparison on differential schemes of solvers

S/W	foam-Extend	Ansys CFX
Solver	Pressure based	
p-U coupling	SIMPLE	coupled
Momentum differential	linearUpwind (1st-2nd Order)	High resolution (1st-2nd Order)
Turbulence differential	Upwind (1st Order)	Upwind (1st Order)

하며, 본 연구에서는 작동유체가 물이므로 물의 밀도인 $997\text{kg}/\text{m}^3$ 을 이용하여 축동력을 계산하였다.

Table 4에는 foam-Extend와 Ansys CFX에 적용된 해석 기법과, 각 항에 대한 차분법이 비교되어 있다. 오픈소스 기반 해석 프로세스의 검증を 위하여, foam-Extend의 해석 결과에 대하여 대조군으로써 상용 프로그램인 Ansys CFX를 사용하였다. OpenFOAM 계열 솔버의 특성 상 Pressure-based, 그리고 압력-속도 항을 분리하여 방정식을 푸는 Segregated solver을 강제로 보이며, 전술된 바와 같이 MRFSimpleFoam 또한 이의 일종인 SIMPLE 기법을 사용하여 압력과 속도를 순차적으로 계산한다. 반면 CFX의 경우는 기본적으로 압력-속도를 동시에 계산하는 Coupled 기법을 기본 해석자로 사용한다. OpenFOAM 계열에서의 Coupled 해석자는 foam-Extend의 pUCoupledFoam 등 일부 존재함이 확인되나, 해당 해석자의 경우 다중 참조 프레임, 혼합면 기법 등의 회전체 인터페이스 적용을 위하여 별도의 코드 수정이 필요한 등 터보기계 영역에서 보편적으로 적용하기에는 어려운 실정이다. 이러한 이유에서 상호간 다른 해석자를 선택하였고, 이러한 해석자의 차이에 의하여 다소간의 차이를 보일 수 있다. 난류 모델에서 계산되는 난류 운동에너지(Turbulent kinetic energy, k)와 난류 확산비(Turbulent specific dissipation rate, ω)의 경우 Ansys CFX와 foam-Extend 모두 상류차분법(Upwind scheme)을 사용하여 해석의 안정성을 우선적으로 확보하였다. 반면 운동량의 경우 foam-Extend와 Ansys CFX의 차분법 호칭이 다소 다른데, foam-Extend에서는 linearUpwindV, Ansys CFX에서는 High resolution으로 칭하며 두 경우 모두 1차 정확도를 보이는 상류차분법과 2차 정확도를 보이는 중심차분법의 혼합 형태로 각각 2차 정확도를 갖는 기법들이다. 본 연구에서는 이러한 2차 정확도를 보이는 차분법들을 선택하여 해석자의 정확도와 수렴성을 모두 확보하고자 하였으며, 상호간 유사한 차분법의 적용으로 해석자 및 기법 차이 등의 형상 이외의 차이에서 기인하는 성능 차이를 최소화하고자 하였다.

Table 5에는 각 경계면에 적용된 인터페이스가 비교되어 있다. cfMesh를 통하여 구성된 비정렬 격자 특성 상 foam-Extend에서는 주기 조건에 대한 1:1 매칭을 시키는 경계조건인 cyclic을 적용하지 못하고 cyclicGGI를 적용하였

Table 5 Comparison on interface boundary conditions

S/W	foam-Extend	Ansys CFX
Periodic	cyclicGGI	GGI
Stage interface	Mixing plane	
Tip interface	conformal	

고, 이와 비슷한 조건에 대한 모사를 위하여 TurboGrid를 통하여 구성된 Ansys CFX 격자 또한 GGI 격자 구성을 적용하여 두 해석 조건을 최대한 비슷하게 적용하였다. 또한 입구 안내깃과 임펠러, 그리고 디퓨저 간 익형의 수가 서로 다름에 기인하여, 각 단 간의 인터페이스는 반경에 대한 속도를 평균하여 다음 단으로 넘겨주는 Mixing plane 조건을 적용하였다. 이와 같이 구성된 차분법 및 경계조건들을 이용하여 유동 해석을 진행하였고, 얻어진 정량적인 결과 및 획득된 유동장을 비교 및 분석하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 정량적 비교

본 연구에서는 2가지의 케이스를 이용하여 해석을 진행하였는데, cfMesh로 구성된 격자를 이용한 foam-Extend 해석결과(이하 Case1), 그리고 TurboGrid로 구성된 격자를 이용한 CFX를 이용한 해석결과(이하 Case2)가 그것이다. 이 두 케이스의 상호 격자계가 다른 cfMesh로 구성된 격자의 셀들 중 일부가 다면체 격자(Polyhedral mesh)로 Ansys CFX는 이를 읽어 들일 수 없음에 기인한다. 이와 같은 이유로 동일한 형상에 대하여 각 해석자에 적절한 격자를 개별적으로 구성하고, 구성된 개별 격자를 이용하여 상호간의 성능을 비교 검토하는 방법을 통하여 해석자의 비교를 진행하였다. TurboGrid의 격자를 OpenFOAM 형태로 변환하는 프로세스 또한 존재하나, 본 연구에서는 이러한 과정에서 좌표계 왜곡으로 인한 격자 품질 저하가 확인되어 수행하지 않았다.

Table 6에는 두 케이스의 성능지수가 제시되어 있다. 양정의 경우 Case1에서 12.84m, Case2에서 12.79m으로 약 0.4% 차이를 보이면서 상호간 유사한 결과를 보였으나, 효율의 경우 Case1에서 80.45%로 높게 평가된 반면 Case2에서는 79.11%로 약 1.7% 차이, 축동력의 경우 Case1에서 18.15kW, Case2에서 18.44kW으로 약 1.6%의 차이를 보이면서 양정의 예측을 잘 수행하지만 축동력의 예측에서 다소간의 차이를 보여 상호간의 효율 예측 차이가 발생하였다. 펌프의 성능지수들 중 양정의 경우 유동장과 압력장, 그리고 축동력의 경우 벽면 압력에 주로 영향을 받는데, 본 연구에서는 이들을 분석하여 해석자 간 성능지수의 차이를 분석하였다.

Table 6 Comparison of performances

Case	#1	#2	Diff. (%)
Solver	foam-Extend	Ansys CFX	
Mesher	cfMesh	TurboGrid	-
Efficiency (%)	80.45	79.11	1.69
Total head (m)	12.84	12.79	0.39
Power (kW)	18.15	18.44	-1.57

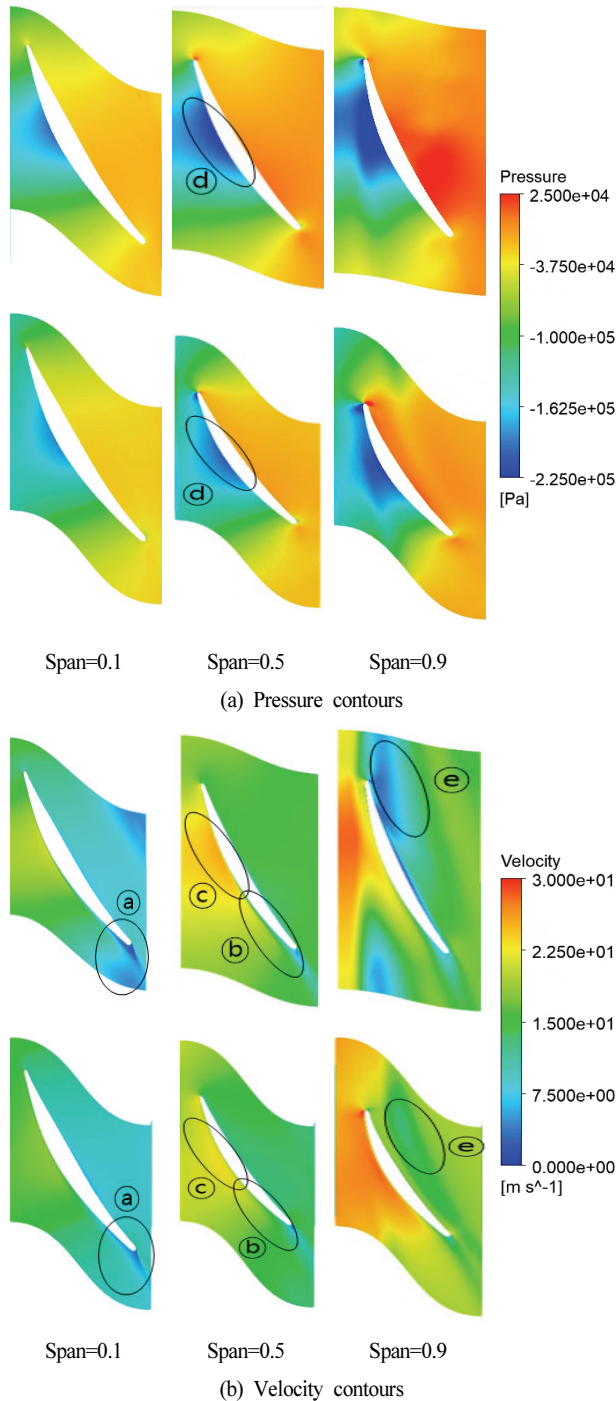


Fig. 5 Flow contours by cases
(Top: Case1, Bottom: Case2)

4.2 임펠러 주변 유동장 분석

Fig. 5에는 두 케이스의 임펠러에서의 미드스팬 압력장과 유동장이 제시되어 있다. foam-Extend 뿐 아니라 simpleFoam 계열 결과로 획득되는 압력장은 밀도에 대하여 나누어진 값이므로 표준 온도에서의 물의 밀도를 곱하여 다시 표현하였다. Fig. 5a는 압력장을, Fig. 5b에는 유동장을 도시하였고 각 그림의 상단은 Case1, 하단은 Case2의 결과를 나타내었다. 허브 주위 유동에 해당하는 Span=0.1의 경우 두 압력장/속도장이 정성적으로 큰 차이를 보이지 않는 현상이 확인된다. Case1에서는 끝단에 의한 저속 영역(㉠)이 다소 넓게 분포함이 확인되나, 그 외의 부분에서 상호간 유사한 경향이 확인된다. 임펠러 주위 유동장의 경우는 두 케이스 모두 서지 등 손실을 발생시키는 유동 현상은 별도로 발생하지 않았으며, 흡입면 후방에 약간의 박리가 관측되었다(㉡). 또한 Case1에서는 익형에 의한 가속 영역이 Case2에 비하여 지배적인 영향을 보이지는 않으며, 이에 따라 해당 영역에서의 압력 강하 정도 또한 보다 크지 않게 발생할 것으로 예측된다. ㉢ 압력장 또한 두 케이스 모두 큰 차이를 보이지 않았으나, 유동장에서의 경향과 동일하게 흡입면의 압력 강하의 영향성에 차이가 발생함(㉣)을 확인할 수 있다. 입구 안내깃의 경우는 두 케이스가 동일한 형태를 보임이 확인되어 별도로 도시하지 않았다. 이러한 유동장에서, 임펠러에서는 정성적으로 큰 차이를 갖지 않는 형태의 유동장 및 압력장을 가짐이 확인된다. 슈라우드 주위 유동에 해당하는 Span=0.9의 경우 압력장에서 흡입면에 의한 저압 영역이 강하게 나타나는 정도를 제외하면 큰 차이를 보이지는 않으나 끝단와류에 의한 영향이 서로 다르게 발생함을 확인할 수 있다(㉤). 그러나 익형 주위의 압력장 분포는 큰 차이를 보이지 않음에서 이들이 성능지수 차이를 발생시키는 주 요인은 아님을 확인할 수 있다. 이를 통하여 Table 6에 제시되어 있는 성능지수의 차이가 입구 안내깃 및 임펠러의 효과에 의한 것이 아님을 확인할 수 있으며, 성능의 차이에 대한 원인이 디퓨저 베인 위치에서의 유동 현상에 기인한 것으로 파악된다.

4.3 디퓨저 베인 유동장 분석

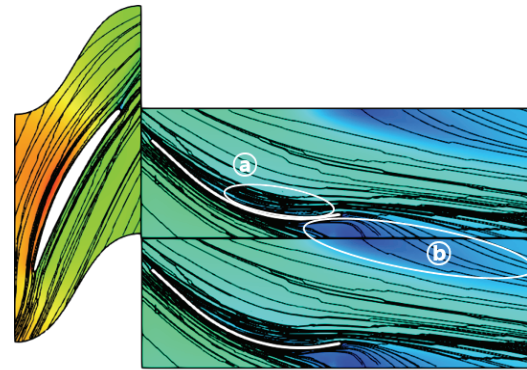
Table 7에는 각 인터페이스에서의 압력값이 제시되어 있다. 혼합면 기법에서 짝을 이루고 있는 영역들의 압력은 매우 작은 수준의 오차를 보여 혼합면 기법이 제대로 적용되고 있음을 확인할 수 있다. 주기 조건을 가지는 영역에서는 임펠러 주기조건에서 Case1과 Case2가 약 6 kPa 가량의 차이를 보이는데, 이는 전압력을 유지시키는 Ansys CFX의 주기 조건의 특성 및 Fig. 5의 미드스팬 속도 차이가 작지 않음을 고려했을 때 허용 가능한 수준으로 판단된다. 혼합면 기법 인터페이스에서는 디퓨저 베인 전방에 해당하는 IMP to DV

Table 7 Comparison of pressure on interfaces

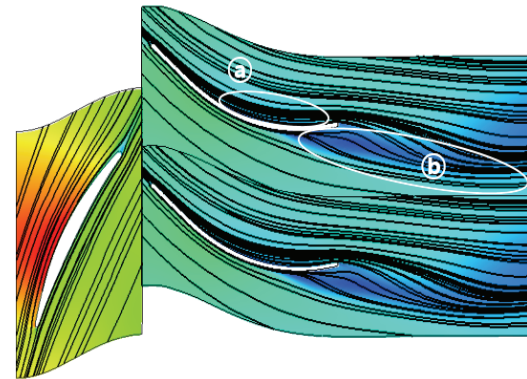
Case		#1	#2	Diff.
Periodic	Inlet guide vane (IGV)	-119.720	-119.826	0.106
		-119.720	-119.826	0.106
	Impeller (IMP)	-63.927	-58.015	5.912
		-63.925	-57.827	6.098
	Diffuser vane (DV)	-4.305	-2.430	1.875
		-4.305	-2.426	1.879
Mixing plane	IGV to IMP	-136.771	-135.124	1.647
		-136.768	-135.638	2.140
	IMP to DV	-21.084	-24.608	3.524
		-21.082	-24.382	3.300

영역에서의 압력 차이가 다른 영역들에 비하여 두드러지게 큰 값을 보이고, 이 영역에서의 유동 현상의 차이로 인하여 주된 성능 차이가 발생하는 것으로 예측된다. 압력 상승분과 직접 관련된 성능지수인 양정이 상호간 유사한 값을 보이며 유동장이 축방향으로 잘 정렬된 IGV 영역에서는 주기조건 간 압력 차이가 크지 않고, 임펠러 영역에서의 압력 상승분 또한 약 1.5 kPa 수준의 차이로 전체 압력상승분의 2% 내의 차이를 보이며 상호간 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 디퓨저 베인에서의 압력차가 약 3.5 kPa 수준으로 약 12% 가량의 차이를 보이며, 해석자 간의 성능지수 차이는 주로 디퓨저 베인에서의 압력 회복에 기인한 것으로 예측된다. 이러한 성능 차이의 원인 분석을 위하여, 해당 영역에서의 유동 흐름을 평가하기 위하여 유선을 도식하였다.

Fig. 6에는 미드스팬 상에서의 유동장과 유선이 제시되어 있다. 두 경우 모두 디퓨저 베인의 압력면 영역에서 박리가 확인되지 않으며(㉓), 이는 임펠러 후단에서의 선화각에 맞도록 디퓨저 베인의 입구각이 설정되었으나 유동을 재정렬 시키기에는 디퓨저 베인의 길이가 충분히 길지 못하여, 압력면 후방부에서 유동이 벽면에 제대로 부착되지 못함을 원인으로 갖는다. 두 유동장 중 Case2의 경우 비교적 빠르게 유동이 재정렬되며 주기조건 면을 넘어가는 유동이 지배적으로 관찰되지 않는 반면 Case1의 경우 유동이 재정렬되는 영역이 비교적 후방에 위치하는 차이를 보인다. 두 가지 케이스 모두 디퓨저 베인 후방에서의 박리와 이에 따른 후류에서 와류(Vortex) 유동이 발생함이 확인되는데(㉔), 이러한 와류 구조가 유선을 통하여 상대적으로 명확하게 확인되고 와류 영역이 좁은 Case2의 경우와 달리 Case1에서는 와류가 발생하나 상대적으로 뚜렷하지 않으며 와류 영역이 넓게 발생하여 유동의 흐름을 더 크게 방해함이 확인된다. 이러한 유동 현상을 통하여 디퓨저 베인을 통과한 유동의 압력 손실이 Case1에서 더 크게 발생함을 알 수 있으며, 이 압력 손실 값에 의하여 Case1에서 입구 가이드 베인, 임펠러 등에서 확보한 양정이 더 큰데도 디퓨저 베인에서의 압력 회복 수준이



(a) Case1 (foam-Extend with cfMesh)



(c) Case2 (Ansys CFX with turboGrid)

Fig. 6 Flow contours and streamlines on midspan

상대적으로 낮아 두 경우의 전양정이 비슷한 수준으로 평가되는 결과를 확인 가능하다.

이와 같이 유동장, 압력장 그리고 유선의 분석을 통하여 전양정이 비슷한 수준으로 확보됨을 확인하였으나, 축동력에 대한 차이의 검증에는 벽면에서의 압력 분포를 확인할 필요가 있어 본 연구에서는 블레이드의 전체 압력 분포를 대표하여 미드스팬에서의 압력 분포를 분석하고 이를 통하여 축동력의 차이에 대한 원인을 분석하였다.

4.4 압력분포 분석

Fig. 7에는 임펠러와 디퓨저 베인 미드스팬에서의 벽면 압력 분포가 도식되어 있다. Fig. 7a에는 각 케이스별 임펠러의 표면압력분포를 겹쳐 도식하였다. 임펠러의 경우 압력 분포에서 확인되는 압력 회복 수준의 차이는 크지 않음이 확인된다. Case2의 경우는 유동장을 통하여 확인했던 정성적인 경향성과 유사하게 선단부에서 정체점 주위의 압력 변화가 보다 급격함이 확인된다. Fig. 5의 압력장에서 흡입면을 나타내는 색이 비슷하게 평가된 것과 달리, 흡입면 전반부의 압력 분포는 상호간에 약간의 차이를 보임이 확인된다. 이는 압력장에서의 압력은 정압력이고 벽면 압력은 전압력임을 고려할 때 상호간의 차이가 압력장보다는 속도장에 의한 것

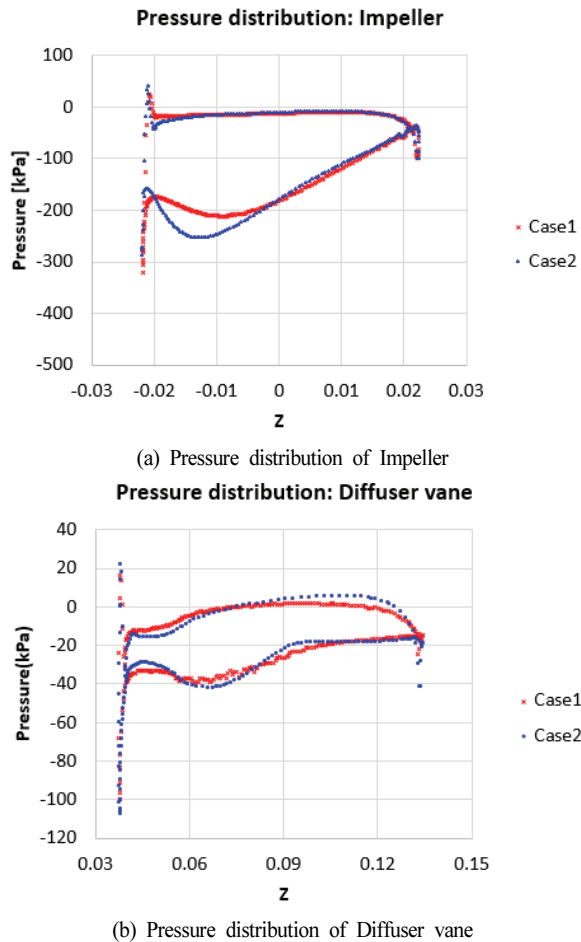


Fig. 7 Wall pressure distribution of Impeller and Diffuser

으로 예측된다. Fig. 5b의 속도장에서 Case1의 경우가 Case2의 경우보다 흡입면 속도 분포가 더 빠름을 확인 가능하며, 상호간의 유동 속도 차이가 전압력의 차이를 발생시키는 원인으로 파악된다. 반면 압력면에서의 속도는 선단부를 제외하면 흡입면에 비하여 다소 빠른 경향성이 확인되었고 이는 선단부 주위에서 압력면에서는 Case2가, 흡입면에서는 Case1이 상대적으로 낮은 벽면 압력을 가지는 원인으로 파악된다. 이러한 국소 영역에서의 벽면 압력 분포 차이를 통하여 두 해석자가 완벽하게 동일한 예측을 수행하지는 않음을 확인 가능하나 전반적인 벽면압력 변화의 경향성이 상호간 큰 차이 없이 유사함 또한 확인 가능하며, 이는 foam-Extend 기반 해석자가 유체기계 성능의 예측에 충분히 유효함을 확인 가능하다.

Fig. 7b에는 디퓨저 베인에서의 압력분포가 제시되어 있다. 임펠러에서의 압력분포와 큰 차이 없이, Case1과 Case2는 유사한 경향성을 보이나 세부적인 영역에서 다소간의 차이를 보인다. 임펠러와 유사하게 흡입면에서의 가속으로 인한 압력 강하가 Case2에서는 강하게 발생하는 반면 Case1에서는 보다 약하게 발생하며 각 유동 현상들에 대하여 압력의 변화가 Case2에서 두드러짐이 확인된다. 또한 Case2의 압력

면 후방에서 상대적으로 급격한 압력 강하가 발생하는 반면, Case1에서는 압력 강하가 Case1보다는 전방에서 발생하며 압력 강하가 급격하지 않음을 통하여 다소 이른 박리와 와류 발생으로 인하여 압력이 감소하는 영역이 상대적으로 넓은 Case1과, 박리 영역은 좁지만 와류가 강하게 발생하는 Case2의 압력장과 벽면압력 경향성이 일치함을 확인 가능하다. 흡입면 상에서는 유선이 디퓨저를 따라 흐르나 약간 불규칙한 Case1과 달리 정돈된 형태의 유동장이 지나는 Case2의 경우가 압력 회복이 더 빠르고 디퓨저 베인 곡률이 낮아지는 흡입면 후단부에서는 두 케이스 모두 압력이 거의 일정함을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 도시된 두 영역에서의 압력 분포는 서로간의 경향성은 유사하나 전반적으로 Case1의 결과가 Case2의 그것보다 각 유동 현상들에 대하여 더 완만한 경향성을 보임이 확인 가능한데, 이는 해석자 검증에서 언급한 상호간의 가장 큰 차이에 해당하는 압력-속도 방정식의 풀이 방법 차이에서 기인할 것으로 예측된다. 그러나 성능지수와 경향성 등의 정량적, 정성적 지표들의 유사성을 통하여 foam-Extend의 MRFSimpleFoam이 축류형 펌프의 성능 평가에 충분히 유효한 해석자임을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 축류형 펌프의 오픈소스 적용을 검토하고, 상용 소프트웨어와의 결과를 비교하였다. foam-Extend는 해석의 CPU time 등에서는 CFX 등의 상용 프로그램에 비하여 부족할 수 있으나, 해석 라이선스 비용 등에 대하여 장점을 가지고 있는 프로그램으로, 솔버와 격자계에 대한 해석 결과의 영향성을 파악하여 티보기계 해석에서의 비정렬격자계의 도입 가능성을 검토하였다. 이 과정에서 다음과 같은 결론을 획득하였다.

- 1) 임펠러에서의 성능 평가 및 유동 현상의 변화는 상호간에 다소간의 차이를 보이나 성능의 평가에 큰 영향을 미칠 만큼의 차이는 아님을 확인하였다.
- 2) 디퓨저 베인에서의 유동장은 정성적으로 비교간 간에 상호 유사하였으나 압력 분포는 Case1이 Case2에 비하여 유동 현상에 대해 다소 완만한 압력의 분포를 보인다.
- 3) Case1과 Case2가 상호간 완전히 일치하는 정량적/정성적 결과를 보이지는 못하나 성능지수 및 유동장 관점에서 큰 차이를 보이지는 않아 비정렬 격자계의 인터페이스를 잘 일치시킨다는 조건 하에 foam-Extend 해석자의 도입을 긍정적으로 고려할 수 있음이 확인되었다.

후 기

본연구는 2025년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(2021202080026D, AI/ICT 기반 가변형 유체기기 설계 · 상태 진단을 위한 기반 · 플랫폼 기술 및 운영 관리 시스템 개발)입니다.

References

- (1) Nguyen, D. A., Lee, H. J., Kim, S., Choi, B. L., Choi, D. H., Kim, G. S., Sun, S., Kim, J. H., 2024, "Multiobjective hydraulic optimization of the diffuser vane in an axial flow pump," *Physics of Fluids*, Vol. 36, No. 7.
- (2) Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., and Fureby, C., 1998, "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques," *Computers In Physics*, VOL. 12, NO. 6, pp. 620~631.
- (3) Foam-Extend, Available online: <https://sourceforge.net/p/foam-extend/foam-extend-4.1/>
- (4) Fahlbeck, J., Nilsson, H., Salehi, S., Zangeneh, M., and Joseph, M., 2021, "Numerical analysis of an initial design of a counter-rotating pump-turbine." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 774. No. 1, IOP Publishing.
- (5) Romain, C., Guibault, F., Devals, C., and Nennemann, B., 2016, "Numerical study of rotor-stator interactions in a hydraulic turbine with Foam-extend," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 49, No. 1, IOP Publishing.
- (6) Balatinec, L., Uroic, T., and Jasak, H., 2021, "Open-Source Cfd Analysis Of Nasal Flows," *OpenFOAM® Journal*, Vol. 1, pp. 2~26.
- (7) Silva, K. S., Júnior, D. A. L., Rodrigues, I. C. S., Sousa, A. R. M, Morais, I. R. M. R., and Fonseca, W. S., 2025, "Hydrodynamic Analysis With OpenFOAM And Maxsurf: A Study On The Use Of Computational Tools In Naval Vessels," *Brazilian Journal Of Petroleum And Gas* Vol. 19, No. 2, pp. 101~108.
- (8) Petit, O., Bosioc, A. I., Nilsson, H., Muntean, S., and Susan-Resiga, R. F., 2010, "A swirl generator case study for OpenFOAM," *25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*.
- (9) Kang, S. H. et al., 2024, "Improvement on Compressible Multiple-Reference-Frame Solver in OpenFOAM for Gas Turbine Flow Analysis," *Appl. Sci.* 2024, 14, 8269.
- (10) ANSYS CFX 22.1, ANSYS Inc.
- (11) Menter, F. R., Kuntz, M., and Langtry, R., 2003, "Ten years of industrial experience with the SST turbulence model," In *Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer*, Antalya, Turkey, Begell House., pp. 625~632.
- (12) cfMesh User Guide, https://cfmesh.com/wp-content/uploads/2015/09/User_Guide-cfMesh_v1.1.pdf
- (13) Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., & Freitas, C. J., 2008, "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications," *Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME*, Vol. 130, No. 7, 078001.
- (14) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Taylor & Francis, USA.