

2020년 CFD 분야 연구동향

박성균* · 임세환

1. 서 론

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)분야는 터빈, 펌프, 수처리 공정, 원자력, 드론, 연료 전지 등 다양한 산업 연구 전반에 이용되고 있으며, 컴퓨터 성능과 수치 계산 방법의 발전과 함께 지속적으로 성장하고 있다. 본 특집에서는 2020년도 한국유체기계학회에서 발표된 논문 중 CFD 분야에 속한 논문 17편의 연구내용을 요약 및 정리하고 최근 연구 동향을 파악하고자 한다.

2. CFD 분야 연구 동향

노민수⁽¹⁾ 등은 원심 압축기의 안정성을 향상시키기 위해 가이드 베인이 결합된 분리된 캐비티(DCGV)를 제안했으며, 가이드 베인의 네 가지 형상변수인 가이드 베인의 요 각도, 피치 각도, 수직 길이 및 캐비티의 축 방향에 대해 3차원 해석을 수행하였다. 유동 해석을 위해 ANSYS CFX 15.0을 이용하여 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS)방정식을 풀었다. DCGV를 이용한 원심압축기는 RC와 DC를 적용한 원심압축기와 비교하여 단열효율의 손실을 최소화하며 스톨마진이 가장 크게 향상된 결과를 보였다. 가이드 베인의 네 가지 형상변수 중 가이드 베인의 수직 길이를 제외한 세 변수는 압축기의 스톨 마진에 민감한 영향을 주며, 요각도가 110°인 경우, 캐비티의 축 방향 위치가 동일한 경우보다 스톨 마진이 향상된 결과를 보였다.

곽명⁽²⁾ 등은 단일 채널 펌프 모델의 성능과 블레이드 두께에 따른 내부 유동 특성에 대해 수치 계산을 수행하였다. ANSYS CFX를 이용하였으며 SST 난류 모델을 적용하였다. 펌프의 이상 유동을 모사하기 위해 Reyleigh-Plesset 캐비테이션 모델을 도입하였다. 얇은 블레이드의 경우 두꺼운 블레이드보다 효율이 높았으며, 정압 변동이 적은 것을 확인하였다. 난류 운동 에너지, 스윙링 유동과 임펠러 반경 방향 힘의 강도는 얇은 블레이드의 펌프 모델에서 낮은 값을 갖는다. 0.8Q, 1.0Q, 1.2Q에서 얇은 블레이드의 임펠러가 두꺼운 블레이드의 임펠러보다 우수한 흡입 성능이 나타남

을 확인하였다.

이재승⁽³⁾ 등은 ANSYS FLUENT 16.1을 사용하여 공냉식 PEMFC(고분자 전해질 연료전지) 스택의 분리판 유로 채널의 설계변수가 온도제어 및 물 관리에 미치는 영향에 대해 연구를 진행했다. 캐소드 공기공급 채널의 폭이 좁아지거나 냉각채널의 폭이 넓어질수록 캐소드 채널과 촉매층에서 상대습도 하락폭이 감소하고 물 농도 증가폭이 커지는 것을 확인하였다. 이를 통해 공기공급 채널 폭을 좁게 하여 물이 외부로 배출되는 양을 줄이고, 건조한 상태에서 작동하는 공랭식 연료전지의 막 탈수현상을 억제할 수 있다는 결론을 도출하였다.

조수용⁽⁴⁾ 등은 포일형 쓰러스터 베어링을 적용해도 원활한 작동이 될 수 있도록 터빈에서의 축 방향 추력을 감소시키기 위해 세 종류의 스칼럼 터빈을 설계하였고, 스칼럼이 없는 경우와 스칼럼의 크기에 따라 효율 감소와 축 추력 감소 효과에 대해 수치 해석 연구를 수행하였다. 유동해석을 위해 CFX를 사용하였고 난류모델은 회전유동에 대해 정확한 결과를 보여주는 SST모델을 적용했다. 스칼럼의 크기에 따라 축 추력은 감소하는 결과를 얻었으며 스칼럼비가 0.45인 경우, 스칼럼이 없는 경우에 대해 29% 감소하는 것을 확인했다. 효율의 경우 로터 뒷면의 간극이 0.6mm이며, 스칼럼비가 0.45인 경우에 상대적인 효율은 4% 감소하는 결과를 보였다.

김승준⁽⁵⁾ 등은 격자계의 구성 및 계산을 통해 이산화 오류를 추정할 수 있는 GCI method를 사용하여 프란시스 수차 모델에 대한 삼차원 정상상태 RANS 수치 계산을 수행했다. 이를 통해, 구성요소의 격자가 전체 격자계의 GCI 계산 결과에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였고, 수치계산을 위해 ANSYS CFX 19.1을 사용했다. 흡출관의 단일 격자에 대한 상대적으로 낮은 격자 조정 계수 및 높은 값을 고려하고, 전체 격자계에서 흡출관의 단일 격자 수정을 통해 흡출관의 값이 개선됨에 따라 전체 격자계의 값도 개선된 결과를 보였다.

남궁근⁽⁶⁾ 등은 ANSYS CFX 17.1을 이용하여 영구자석 모터를 이용한 고속 터보 공기압축기에 대한 냉각유로의 냉각

* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
E-mail : psg@seoultech.ac.kr

성능과 유로 형상 변화에 따른 열 유동 특성에 대해 연구를 진행했다. 냉각 유로 내부 유동영역은 삼차원 정상상태 RANS 방정식에 의해 해석을 수행하였다. 영구자석 모터의 냉각 유로는 수냉 유로보다 공냉 유로가 모터 냉각에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 냉각 매체의 유량변화를 통해 수냉 유로가 영향을 미치는 범위는 고정자 상단과 하우징 부분이었으며, 공냉 유로는 대부분의 영역에 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. 코일부에 추가된 공냉 유로의 면적 증가로 인한 냉각 공기의 유량 변화는 고정자와 회전자에 각각 다른 영향을 주며, 효과적인 냉각을 위해서 코일부의 공냉 유로 면적의 최적화가 필요함을 확인했다.

곽명⁽⁷⁾ 등은 다단 원심펌프 모델의 성능 향상과 소형화를 위해 ANSYS CFX를 사용하여 기존 펌프 모델과 새로운 유로 모델의 성능을 비교 분석하였다. 새로운 펌프 모델의 지름과 축 너비는 기존 펌프 모델보다 작으며, 입구각은 증가하였고, 출구각은 감소하였다. 임펠러 단면적은 기존 모델보다 크고 굴곡진 형상으로 인해 캐비테이션 성능을 향상시켰다. 성능 곡선과 손실을 비교한 결과 기존 모델에 비해 향상된 것을 확인하였으며, 재순환 유동 흐름이 감소한다는 경향을 도출하였다.

강병윤⁽⁸⁾ 등은 ANSYS CFX를 이용한 수치계산을 통해 디퓨저와 인터페이스를 실제 형상에 맞게 구현하는 것을 반영하여 깃 없는 디퓨저의 폭 변화가 터보펌프에 성능과 효율에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 회전차보다 폭이 커진 디퓨저의 경우, 늘어난 폭으로 인해 면적이 증가하여 반경방향 속도가 감소했고, 접선 방향의 속도는 증가했다. 디퓨저의 폭이 늘어난 영향으로 허브, 팁 양쪽 영역에서 역류가 발생하여 입구에서 손실계수가 급격하게 증가하는 현상을 확인하였다. 하지만 증가한 접선 방향 속도로 인해 터보펌프의 양정 증가폭이 손실의 증가폭보다 컸기 때문에 결과적으로 터보펌프의 효율이 증가한다는 결론을 도출하였다.

장승언⁽⁹⁾ 등은 3축 편심 나비형 밸브에서 발생하는 공동현상에 의해 발생하는 소음 및 진동으로 인한 파손, 부식과 지진에 의한 파손에 대해 분석하였다. 공동현상은 ANSYS CFX 14.5를 통해 계산하였고, k-epsilon 난류 모델을 적용하였다. 낮은 개도인 10°와 20°에서 100kg/s의 질량유량에서는 공동현상이 예측되나, 50kg/s의 낮은 질량유량에서는 공동현상이 예측되지 않았다. 30°와 40°에서 계산결과 30°에서는 공동현상이 예측되나 40°에서는 예측되지 않는 경향을 도출하였다. 정적내진해석 결과 요크 및 밸브 커버 상단에만 변형량과 응력이 나타났으며 각 직경별 0°, 90° 개도 모두 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생함을 확인하였다. 이를 통해 실제 원자력 발전소에 본 연구에 사용된 3축 편심 나비형 밸브가 체결되었을 때 5G의 지진이 발생하더라도 밸브 디스크 및 시트에는 영향이 없으며, 밸브 요크 및 커버 상단에도 항복응력보다 낮은 최대응력이 발생하기 때

문에 구조적으로 안전하고, 냉각공조계통과 SFS에도 큰 영향을 미치지 않을 것으로 기대된다.

전상욱⁽¹⁰⁾ 등은 고압터빈엔진의 냉각을 위한 막냉각홀 유동 분석을 위한 LES해석의 가능성을 제시하기 위해 RANS 결과와 비교를 진행하였다. 수치 계산을 위해 CFX 16을 사용하였으며, LES 해석에서는 WALE 아격자 모델, RANS 해석에서는 SST k-omega 모델을 적용하였다. LES는 RANS가 파악하지 못하는 부분의 박리와 같은 유동장을 묘사할 수 있을 것으로 기대된다. 압력면에서는 냉각홀 출구 근처, 흡입면에서는 홀 외부의 날개표면에서 LES는 박리를 묘사하여 냉각홀에서 분사되는 유동의 흐름이나 와류의 크기를 RANS와는 다르게 예측하였다. LES는 RANS에 비해 압력면에서는 와류의 크기를 작게, 흡입면에서는 벽면에서 멀리 떨어져 흐르는 것으로 나타났다. 이후 터빈 블레이드 및 단(stage)모델에 대해 적용, 비교하여 LES 사용의 타당성 검토가 필요함을 확인했다.

문형욱⁽¹¹⁾ 등은 누설 방지 시스템이 고려된 임펠러에 의해 발생하는 추력을 예측하기 위해 임펠러 후면과 래버린스 실의 압력강하, 누설 유량에 대한 해석 모델을 개발하였다. 이 모델을 임펠러에서 발생하는 압력 분포를 통해 추력을 계산하였다. 또한 임펠러의 회전속도, 래버린스 실의 클리어런스, 이의 개수, 임펠러 케이싱 사이 간극의 변화가 추력과 누설 유량에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 모델을 통한 해설 결과와 CFD 해석 결과 후면의 압력강하와 래버린스 실의 공동의 압력은 각각 2%, 5%이내의 오차로 잘 일치하였다. 래버린스 실의 클리어런스가 증가하면 누설 유량과 임펠러 추력이 감소하였다. 이의 개수가 증가할 경우 누설 유량은 감소하며, 추력은 증가함을 확인하였다. 임펠러 후면과 케이싱 벽면 사이의 간극의 감소는 임펠러 후면의 유체 유동의 간섭효과를 증가시켜 추력과 누설 유량 모두 감소시킨다. 이를 통해 임펠러의 추력과 래버린스 실의 누설 성능은 밀접히 연관되어 있음을 확인하였다.

최영도⁽¹²⁾ 등은 AJP(annular jet pump)에서 J-Groove의 깊이, 길이, 각도 및 개수에 따른 캐비테이션 성능을 분석하였다. ANSYS CFX 19.2를 사용하였고, Realizable k-epsilon 난류모델을 도입하였다. 깊은 J-Groove 통로는 AJP에서 높은 압력 분포를 갖게 한다. J-Groove의 길이는 목 입구의 압력 분포에 영향을 미치며 폭과 각도는 압력 분포에 큰 영향을 갖지 않는 것을 확인하였다. J-Groove는 펌프 혼합 영역에서 압력 분포에 영향을 미치며 펌프내 캐비테이션을 억제한다. 본 연구를 통해 J-Groove의 최적화된 매개 변수를 통해 캐비테이션으로 인한 펌프 성능의 저하를 회복할 수 있다는 결론을 도출하였다.

이봉주⁽¹³⁾ 등은 고압, 해수 내식성, 침식성 등에 적합한 토출량 300m³/h, 전양정 700m이상, 최고압력 100bar급의 해수 담수화 펌프 개발을 진행하였으며, 3차원 유동 해석을

수행하여 디퓨저 및 리턴 베인의 설계안을 비교 분석하였다. 해수 유동에 지속적으로 노출되는 부품들은 부식과 침식에 대한 저항성이 높은 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강을 이용하였다. 임펠러의 전면과 후면의 전압력 차이로 인해 발생하는 축추력 상쇄를 위해 최종단에 평형 디스크식 수력평형 장치를 적용하여 스러스트 베어링이 필요없는 구조를 적용하였고, 진동을 고려하여 Anti-Friction 베어링을 사용하여 설계를 진행했다. 펌프의 성능평가를 위한 해석은 ANSYS CFX 18.0을 사용하였고, k-omega SST 난류모델을 적용하였다. 디퓨저에서 전압력 손실이 유동 재순환의 영향을 크게 받는다는 결과를 보였다.

최석민⁽¹⁴⁾ 등은 2단 베인의 형상에 슈라우드면 필렛의 크기 변화에 따른 영향을 ANSYS 15을 통해 유동, 열전달 열응력분포에 대해 수치계산을 수행하였다. 슈라우드면의 필렛 크기가 증가될수록 전단부에서 발생하는 이차유동의 크기가 줄어드는 경향을 확인하였다. 이로 인해 전단부 외부의 열전달계수가 감소하였으며 최대 열응력의 크기도 약 14% 감소하였다. 본 연구를 통해 2단 베인 설계시 슈라우드면의 필렛 형상을 키운다면 최대 열응력을 감소시킬 수 있으며, 수명을 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.

최종웅⁽¹⁵⁾ 등은 모델수차 성능시험의 불확도 향상을 위해 Guide plate, Straightener, Test rig와 모델수차 연결부에 대해 개수, 형태, 각도를 변화시켜 전산해석을 수행하였다. ANSYS CFX를 사용하였으며, 연결부에는 SST 난류 모델을 적용하고, 그 외 모델에는 standard k-epsilon 모델을 도입하였다. Guide plate는 4EA, Straightener의 형태는 ST인 경우 Test-rig 내 유동 안정화 측면에서 안정적이므로 불확도 측면에서 효율적인 결론을 도출하였다. 모델수차와 Test-rig 연결부의 각도는 내부 유동 변화를 최소화하기 위하여 7°이하의 형상을 사용하는 것이 효율적인 것을 확인하였다.

유민수⁽¹⁶⁾ 등은 수처리공정 중 기계적 교반 방식의 혼화공정을 개선하기 위해 ANSYS CFX 14를 사용한 수치계산을 통해 최적화된 위어의 낙차를 이용한 혼화방식의 개선 방안을 제시하였다. 부력을 고려한 이상 유동 해석을 적용하였고, 혼화기 내의 믹서의 회전을 정확히 모사하기 위해 SST 난류모델을 이용하였다. 혼화지 위어의 높이를 기존모델에서 0.2m 증고하고 착수정 수문을 추가한 경우 착수정 이후의 수두 증가로 인해 낙차수두가 0.7m 이상되어 충분한 혼화강도를 갖기 때문에 가장 최적의 유동을 얻을 수 있음을 확인하였다. 낙차수두에 의한 무동력 낙차혼화를 통해 기존 기계식 혼화기 12기를 사용하는 것 이상으로 혼화효과가 높고 연간 약 1억의 에너지 절감효과를 갖는 사실을 확인하였다. 또한, 착수정 및 혼화지에서 침전지까지 이르는 분배수로 길이가 약 30m 단축시키는 효과도 얻을 수 있다는 결론을 도출하였다.

이근표⁽¹⁷⁾ 등은 유인 드론용 익형의 최적 설계를 위해 세 가지 상용 익형과 생체모방 독수리 익형의 공력 성능에 대해 수치계산과 실험을 통해 확인하였다. 이를 바탕으로 NACA4412와 독수리 익형을 기반으로 설계한 프로펠러의 정지비행 추력 성능과 공력 소음을 실험적으로 검증하였다. 익형의 수치계산은 ANSYS Fluent 19.0을 사용하여 2차원 정상상태 해석을 진행하였고, 프로펠러의 정지비행 해석은 ANSYS CFX 19.0을 사용하였다. 두 해석 모두 SST k-omega 난류모델을 사용하였다. NACA4412와 NACA4407의 최대 양력계수는 각각 1.39, 1.02로서 두께비가 큰 NACA4412가 36.2% 더 높은 결과를 도출하였다. 동일 두께비의 독수리 익형과 NACA4406의 최대 양력계수는 각각 1.74, 1.02로 캠비가 큰 독수리 익형이 64% 높은 특성을 확인하였다. 정지비행 수치계산 결과와 실험 결과와의 추력 성능 오차는 5%이내로 높은 해석의 신뢰도를 보였다. 독수리 익형을 적용한 모델이 NACA4412를 적용한 모델의 추력 계수보다 32% 높은 값을 보였으며 음압 레벨과 스펙트럼 측정 결과 독수리 익형을 적용한 모델이 1.9dB 낮게 나타냄을 확인하였다.

3. 결 론

2020년도 한국유체기계학회에서 발표된 논문을 바탕으로 CFD 분야의 연구동향을 살펴보았다. 펌프, 압축기, 터빈과 관련된 분야뿐만 아니라 수처리 공정, 연료전지의 냉각, 드론의 공력성능, 모터 등 다양한 분야에서 CFD를 활용하여 연구를 진행하였으며, 각 분야의 공학적인 문제를 해결하고 최적 설계를 도출하는 데 기여하였다.

References

- (1) 노민수, 마상범, 김광용, 2020 “원심압축기 공력안정성 향상을 위한 분리된 캐비티 내 가이드 베인의 매개변수 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제 1호, pp. 5~14.
- (2) 광명, 최영도, 2020, “단일 채널 펌프 모델의 성능 및 내부유동 특성에 대한 임펠러 블레이드 두께의 영향”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제 1호, pp. 15~22.
- (3) 이재승, 이남민, 임기성, 최재유, 주현철, 2020, “패시브 타입 공랭식 연료전지 성능향상을 위한 캐소드 채널 폭 비율에 대한 수치해석적 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제 1호, pp. 40~48.
- (4) 조수용, 최범석, 임형수, 2020, “스켈럼이 구심터빈의 성능에 미치는 영향”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제 1호, pp. 56~64.
- (5) 김승준, 최영석, 조용, 최종웅, 현정재, 주원구, 김진혁, 2020, “Grid Convergence Index 방법을 통한 프란시스 수차 모델의 격자계 분석”, 한국유체기계학회 논문집, 제23

- 권, 제2호, pp. 16~22.
- (6) 남궁근, 주원구, 손석우, 김준호, 박준영, 김병국, 구대현, 2020, “영구자석 모터의 냉각유로에 대한 수치해석적 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제2호, pp. 35~41.
 - (7) 광명, 최영도, 2020, “고압 다단 원심펌프의 성능향상 및 소형화를 위한 유로 형상 설계”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제2호, pp. 42~50.
 - (8) 강병윤, 최창호, 2020, “깃 없는 디퓨저의 폭 변화가 터보펌프의 수력성능에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제3호, pp. 21~27.
 - (9) 장승언, 조성휘, 장영운, 전인수, 이원희, 김홍집, 2020, “원자력 발전소용 3축 편심 나비형 밸브의 저개도 공동현상에 대한 수치적 연구 및 밸브에 대한 내진해석”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제3호, pp. 42~47.
 - (10) 전상욱, 강영석, 이동호, 2020, “터빈노즐의 막냉각홀에 대한 Large Eddy Simulation의 적용”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 5~11.
 - (11) 문형욱, 김태호, 2020, “저널 래버린스 실이 임펠러 추력 및 누설에 미치는 영향”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 12~24.
 - (12) 최영도, 쉬레스트 우즈왈, 2020, “J-Groove에 의한 환형 제트 펌프 캐비테이션 성능 개선”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 25~35.
 - (13) 이봉주, 임사우, 조현욱, 이은정, 한민섭, 2020, “100bar급 담수화용 고압 해수펌프 개발”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 48~53.
 - (14) 최석민, 김태현, 조형희, 2020, “가스터빈 2단 베인 슈라우드면 필렛 크기 변화에 따른 효과 분석”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제5호, pp. 15~19.
 - (15) 최종웅, 조용, 조현식, 현정재, 박성순, 김선우, 2020, “CFD에 의한 모델수차 성능시험 불확도 향상을 위한 Test-rig 유동 안정화에 관한 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제5호, pp. 20~27.
 - (16) 유민수, 김홍집, 2020, “CFD와 실증실험 적용을 통한 최적혼화 방법 도출 및 수리구조개선으로 정수장 혼화방법 개선”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제5호, pp. 43~49.
 - (17) 이근표, 김수정, 염태영, 이승배, 2020, “유인드론용 생체모사 익형의 공력 및 소음특성에 대한 연구”, 한국유체기계학회 논문집, 제23권, 제6호, pp. 18~24.