

2023년 압축기 분야 연구동향

서정민*

1. 서 론

2023년 한 해 동안 한국유체기계학회 논문집과 한국유체기계학회 하계 및 동계 학술대회의 논문 중 압축기 분야를 통해 발표된 논문의 연구내용을 요약하여 소개한다. 한국유체기계학회 논문집에는 압축기 분야에 대한 논문은 발표되지 않았고, 한국유체기계학회 하계 및 동계 학술대회에서 압축기 관련하여 12편의 논문이 발표되었다. 2017년도에 15편, 2018년도에 18편으로 발표되던 논문수가 2019년도 및 2020년도에 각각 6편으로 크게 급감한 이후 2021년도에는 다시 예전 수준과 유사하게 논문집에 1편, 학술대회에 15편, 총 16편의 논문이 발표되었으나, 2022년도에는 다시 학술대회 논문 9편으로 감소하였다. 2023년도에는 논문집에 3편, 학술대회에 9편으로 총 12편의 논문이 발표되었다.

본 연감에서는 2023년도 한국유체기계학회 논문집 논문 3편과 한국유체기계학회 하계 및 동계 학술대회에서 발표된 논문 9편을 압축기의 구동형식에 따라 원심압축기와 축류압축기, 용적형 압축기 및 기타 압축기로 구분하여 소개한다.

2. 원심압축기

원심압축기는 2017년도에 13편, 2018년도에 11편의 논문이 발표되었고, 2019년도에 3편, 2020년도에 5편의 논문이 발표되어 크게 감소한 이후 2021년도에 10편, 2022년도에 7편, 2023년도에 6편의 논문이 발표되어 다소 증가하였다.

박태춘 등⁽¹⁾은 1,000마력급 터보샤프트엔진용 원심압축기의 슈라우드 케이싱에 저속 영역에서의 서지 마진 확보를 위해 블리드(bleed) 방식의 케이싱 트리트먼트(casing treatment)를 적용하는 연구를 수행하였다. 임펠러의 스플리터 전연 팁 주변에 폭 2mm의 블리드 슬롯을 적용하였고, 기준 모델 대비 블리드 슬롯의 위치를 변화시키면서 공력 성능 및 서지 마진의 변화를 측정하여, 블리드 슬롯 위치에 따른 서지 시작점이 발생하는 유량을 확인하였다.

박치용 등⁽²⁾은 연료전지차량용 공기압축기에서 중공 재순환 유동에 따른 축 하중 분석 및 설계에 대한 연구를 수행하

였다. 대상 압축기의 경우 축 하중을 지지하는 스투트 베어링이 적용되고, 축 하중 저감과 모터 냉각을 위해 중공축을 적용하여 재순환 유로가 적용된다. ANSYS CFX를 활용하여 재순환 유로에 따른 압축기 성능과 축 하중 분포에 대해 CFD 해석 분석을 진행하고, 축 하중에 따른 스투트 베어링의 사이즈와 회전 디스크에 대한 설계 연구를 수행하였다. 중공축을 적용함으로써 별도의 외부 냉각 장치가 필요 없다는 장점이 있지만 임펠러의 후면에서의 리크와 재순환되는 유동에 의한 압축부의 손실이 발생하기 때문에 성능은 감소하게 되며, 리크에 의해 임펠러 후면의 압력분포가 변화되며, 축 방향 하중에 변화가 발생하게 된다. 본 연구에서 중공축 적용 유무에 대한 장단점에 대해 분석하였다.

신용한 등⁽³⁾은 압력비 4:1의 천음속 원심 압축기를 대상으로 블레이드 필렛 반지름이 천음속 원심압축기 공력성능 및 구조 건전성에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 블레이드와 허브가 맞닿는 지점에 허브 필렛이 없는 깨끗한 모서리 케이스와 다양한 필렛 반경의 케이스가 압축기 공기역학에 미치는 영향을 조사하기 위해 수치 해석을 수행하였다. 응력평가를 위한 정적 구조해석과 함께 원심력에 따른 강성변화 효과를 반영한 사전응력 모달 해석을 이용하여 필렛 반경 증가에 따른 고유진동수 변화를 해석하였다. 필렛 반경을 최소화할수록 공력 성능은 향상되나 필렛 반경을 조정하면 공진 마진이 변경될 수 있기 때문에 공기역학적 성능을 극대화하고 공진 응답으로 인한 피로 파괴에 대한 구조적 무결성을 보장하려면 적절한 필렛 형상 선택이 필요하다는 결론을 도출하였다.

김준성 등^(4,5)은 LNG 운반선의 화물탱크에서 발생하는 증발가스(BOG)를 처리하는 카고 핸들링 시스템에 적용되는 원심 압축기 개발에 관한 연구를 수행하였다. Concepts NREC사의 COMPAL과 AxCent 프로그램을 이용하여 COMPAL의 two-zone 모델을 이용한 1D 해석 결과와 AxCent로 생성된 3D 형상에 의한 3D CFD 해석 결과를 비교하여 two-zone 모델의 압축기 성능 예측에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 MATLAB 등을 사용하여 압축기에 필요한 기초 사양인 유량, 입구 압력 및 온도, 압력비 등을 입

* 한국기계연구원 탄소중립기계연구소(KIMM Institute of Carbon Neutral Energy Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials)
E-mail : jmseo@kimm.re.kr

력하면, 압축기의 성능 및 형상에 관한 정보를 도출하는 예비설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 예비설계 프로그램은 Concepts NREC사의 COMPAL의 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

유일수⁽⁶⁾는 2차원 등각 원심형 임펠러의 미끄럼 계수에 관한 연구를 수행하였다. Sheets가 제안한 근사적 해법을 이용하여 2차원 등각 블레이드에 대한 미끄럼 계수식을 유도하였다. 제안된 미끄럼 계수를 Wiesner와 팽기석의 모델과 비교하였고, Wiesner 식보다 더 넓은 범위의 블레이드 개수 및 각도에서 잘 일치하는 결과를 도출하였다. 또한 현절비 보정식을 반경비와 블레이드 개수, 각도의 함수로 수정하여 정확성을 높였다.

3. 축류압축기

축류압축기에 관해서는 2017년도에 1편, 2018년도에 5편, 2019년도에 2편, 2020년도에 1편, 2021년도에 5편, 2022년도에 1편의 논문이 발표되는 등 매년 1편~5편 정도의 논문이 발표되었고, 2023년도에는 예년의 평균 수준인 3편의 논문이 발표되었다.

배성환 등⁽⁷⁾은 NASA Rotor-67 천음속 축류 압축기 로터를 대상으로 익단과 허브 입구 압력 왜곡이 압축기 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 입구 압력 왜곡 상황을 모사하여 3가지 유형의 입구 압력 분포를 설정하였고, ANSYS CFX를 사용하여 유량-압력비 및 유량-효율 성능 곡선을 도출하고 실속 마진 변화에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다.

양현준 등⁽⁸⁾은 발전용 가스터빈 축류 압축기의 블레이드 필렛 형상에 대한 연구를 수행하였다. 5가지 치수의 블레이드 필렛 반경에 대해 ANSYS CFX를 이용한 수치해석을 수행하였고, 유량-압력비 및 유량-효율 성능 곡선을 도출하여 필렛 반경에 따른 성능 변화를 확인하였다. 필렛 반경이 증가할수록 필렛 부근에서 불안정한 유동이 생성되어 공력 성능이 감소하는 결과를 도출하였다.

박근성 등⁽⁹⁾은 URANS 해석을 통해 천음속 축류팬 정익의 스테킹 라인이 스톨 마진에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 한국항공우주연구원에서 개발한 싱글스테이지 팬을 해석 모델로 하여, 정익 블레이드 스펠 70%, 80%, 90%의 적층라인에 변화를 주어 효율 및 스톨 마진을 확인하였다. 최적화된 팬의 정익 블레이드는 기존 팬에 비해 유동 박리가 크게 감소하였고, 동익의 통과 충격파는 하류로 이동하여 팬의 효율을 향상시키고, 스톨 마진을 증가시킨다는 결론을 도출하였다.

4. 용적형 압축기

용적형 압축기로는 왕복동 압축기, 로타리 압축기, 사판식

압축기, 스크류 압축기, 스크롤 압축기, 스윙 압축기 등이 있는데, 한국유체기계학회 논문집 및 한국유체기계학회 학술대회에서 2015년도에는 로타리 압축기 1편, 스크롤 압축기 2편으로 총 3편의 용적형 압축기 논문이 발표된 이후, 2016년도에는 로타리 압축기 1편이, 2017년도에는 스크류 압축기 1편이 발표된 후 한동안 용적형 압축기에 대한 발표 논문이 없었다. 이후 다시 2022년도와 2023년도에 각각 1편의 스크롤 압축기에 대한 논문이 발표되었다.

유장곤 등⁽¹⁰⁾은 스크롤 압축기에서 여러 곡선을 이어 붙이는 하이브리드 랩의 스크롤 형상에 대해 최적 설계에 대한 연구를 수행하였다. 하이브리드 랩은 곡선의 개수에 비례하는 자유도 및 스크롤 최소 두께 등 곡선 간의 상호작용을 경제조건이 설계의 어려움을 가중시킨다. Proximal Policy Optimization (PPO) 알고리즘을 활용한 강화학습 기반 최적화를 수행하였다.

5. 기타 압축기

기타 압축기로는 고진공 펌프의 하나인 터보분자펌프에 대한 논문과 다단 압축기 운용 및 모니터링을 위한 가상 현실화 시스템 플랫폼에 대한 논문이 각각 1편씩 발표되었다.

방재성 등⁽¹¹⁾은 회전속도 변화에 따른 볼트 체결부 접촉강성변화를 고려한 터보분자펌프 로터의 고유진동수와 고유모드 변화에 관한 연구를 수행하였다. 회전속도가 상승함에 따라 터보분자펌프의 블레이드 휠과 주축 간의 열박음 상태나 전하중을 적용한 볼트체결부의 강성 변화가 기준에 고려하지 않았던 추가적인 공진모드를 발생시키는 것으로 예상하여 이를 3차원 유한요소를 적용하여 분석하고, Campbell 선도로 분석을 통해 회전속도 변화에 따른 고유진동 모드의 변화에 확인하였다. 또한 정격속도로 블레이드 휠이 회전할 때 원심력에 의해 변형이 발생하며, 이를 위해 볼트가 허용하는 전하중을 충분히 적용하더라도 블레이드 휠이 주축과 충분한 접촉강성을 갖게 하는 데는 한계가 있다는 결론을 도출하였다.

하운석 등⁽¹²⁾은 압축기, 필터 모듈 유닛, 드라이어, 저장탱크 및 밸브 등의 제어기로 구성된 오압 프로세싱 공기 공급 시스템을 대상으로 다단 압축기 운용 및 모니터링을 위한 가상 현실화 시스템 플랫폼 기술에 관한 연구를 수행하였다. 고출력 다단 압축기 모니터링 및 운용효율을 높이기 위해 가상 현실화 시스템 플랫폼 기술 구성에 관한 연구를 진행했다. DX(digital transformation) 핵심 기술인 ICT (information and communication technologies) 기술과 도메인 경험을 융합하여 데이터 수집부, 논리 모델부 그리고 가시화 부로 이루어진 가상 현실화 시스템을 구성했다. 또한 엔지니어링 해석 데이터와 도메인 지식을 적용하여 실제 다단 압축기의 물리적인 특성을 가상 현실화 시스템에 반영하였다.

6. 결 론

2023년 한 해 동안 한국유체기계학회 논문집과 하계 및 동계 학술대회를 통해 발표된 논문을 중심으로 압축기 분야의 연구동향을 간단히 정리하였다.

압축기 분야에서 연구 동향에 대해 서술한다면 15편의 논문이 발표된 2017년과 18편의 논문이 발표된 2018년 이후 6편의 논문이 발표된 2019년 및 2020년에 압축기 분야 학술발표가 다소 위축되었으나, 2021년도에는 16편의 학술발표로 예전 수준으로 회복되었다. 하지만 2022년도에는 9편의 학술발표로 다시 감소하였다. 2023년도에는 12편의 논문이 발표되어 다소 증가하였다.

압축기 연구 내용의 특징을 살펴보면 특정 분야의 압축기에 연구가 편중되어 있지 않고 다양한 분야의 압축기에 대한 연구 결과들이 발표되었다.

References

- (1) Park, T. C., Park, S. H., Lim, B. J., Cha, B. C., Kang, Y.-S., and Rhee, D.-H., 2023, "Experimental Investigation of Casing Treatment on Aerodynamic Performance of Centrifugal Compressor for 1000shp-class Turboshift Engine," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, KSFM2023-10305.
- (2) Park, C. Y., Yang, H. S., and Lee, J. S., 2023, "Axial load analysis and design study on hollow circulation flow of air compressor for Fuel cell vehicle," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, KSFM2023-20301.
- (3) Shin, Y.-H., Kang, H.-S., and Kim, Y.-J., 2023, "Effects of Blade Fillet Radius on Aerodynamic Performance and Structural Integrity in a Transonic Centrifugal Compressor," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 26, No. 5, pp. 72~78.
- (4) Kim, J.-S., Kim, D.-Y., and Kim, Y.-T., 2023, "A Study on the Development Direction of Centrifugal Compressors for LNG Cargo Handling Systems," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, KSFM2023-10303.
- (5) Kim, J.-S., Kim, D.-Y., and Kim, Y.-T., 2023, "A Fundamental Study on the Preliminary Design of Centrifugal Compressors for LNG Cargo Handling Systems," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, KSFM 2023-20303.
- (6) Yoo, I., 2023, "Expression of Slip Factor for Two-dimensional Radial Impeller with Equiangular Blades," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 26, No. 2, pp. 16~24.
- (7) Bae, S.-H., Kim, S., and Kim, Y.-J., 2023, "Effects of Inlet Pressure Distortion at Tip and Hub on Axial Compressor Performance," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, KSFM2023-20302.
- (8) Yang, H.-J., Kang, H.-S., and Kim, Y.-J., 2023, "A study on the blade fillet geometry of industrial gas turbine axial compressor," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, KSFM2023-10304.
- (9) Park, K. S., Zamiri, A., Choi, M., Lee, B. J., and Chung, J. T., 2023, "Effects of Stator Stacking Line on Stall Margin Improvement in a Transonic Axial Fan via URANS Approach," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, KSFM2023-10301.
- (10) Yoo, J., and Kim, D., 2023, "Optimal design of an involute-connected scroll compressor based on reinforcement learning," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Summer Annual Meeting, KSFM2023-10302.
- (11) Bang, J.-S., Seo, J., Park, C. H., Park, H. G., and Lee, J. B., 2023, "Study on Variation of Resonance Frequencies and Mode Shapes for Turbomolecular Pump Rotor Considering Variation of Contact Stiffness of Bolt Joint According to Rotating Speed Change" The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 26, No. 6, pp. 31~40.
- (12) Ha, Y., and Lee, Y., 2023, "Research on Platform Technology of Cyber-Physical System for Operation and Monitoring of Multi-stage Compressor," Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KSFM 2023 Winter Annual Meeting, KSFM2022-20304.