

CFD해석기법을 적용한 다단펌프 성능향상에 관한 연구

김상유*, 김재열**,#, 고가진***

*조선대학교 일반대학원 기계시스템·미래자동차공학과, **조선대학교 기계공학과,

***조선대학교 지능형로봇 혁신공유대학 사업단

A Study on Performance Improvement of Multi-stage Pump Applying CFD Analysis Technique

Sang-Yu Kim*, Jae-Yeol Kim**,#, GAO JIACHEN***

*Dept. of Mechanical System and Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University

**Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University

***Intelligent Robot Innovation Sharing University Project Team, Chosun University

(Received 20 January 2022; received in revised form 24 January 2022; accepted 14 February 2022)

ABSTRACT

Recently, the demand for ultra-precision processing has increased owing to the increase in the demand for high-performance ultra-precision optical parts in the fields of information technology (IT), bio, healthcare, aerospace, and future automobiles. In this study, a performance improvement of a multi-stage pump was achieved by improving the pump casing structure rather than using the existing performance improvement method. To verify the performance improvement, the CFD analysis reliability of the existing pump, Pump A, was verified using the FLUENT app in the analysis software ANSYS, and the pump casing was improved through the verified CFD analysis of Pump B. Therefore, we want to analyze the performance improvement.

Keywords : CFD(전산유체역학), Multistage Centrifugal Pump(다단원심펌프), Performance Improvement(성능 개선), Turbulence Model(난류모델), Hexagon Mesh(육각 해석격자)

1. 서 론

최근 IT기술의 발전과 전기자동차의 발전으로 초정밀급 가공의 필요성이 증가하였다. 초정밀가공은 형상정도와 표면조도를 모두 만족시키기 위해 가공 정밀도의 한계를 추구하는 최고의 가공정

밀도를 갖는 가공법이라 할 수 있다. 2000년대 들어서 1나노미터 전후의 가공정밀도를 보이고 있으나, 절삭가공이라는 관점에서 보면 원자의 격자간 간격인 0.3나노미터까지가 최대한계라고 볼 수 있다. 초정밀급 가공의 필요성으로 최근 들어 곡면 상에 미세 구조를 생성하는 기술을 필요로 하는 응용분야가 발생하고 있다.^[1-4] 초정밀가공을 위해 공작기계의 구성장치 중 클린트럼프는 공작기계의 절삭 보링 및 그라인딩 작업 시 가공물과 공

Corresponding Author : jykim@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7745

구를 냉각시키고 절삭된 칩을 분산시키거나 세척하기 위한 절삭유를 작업테이블 또는 가공 위치 등에 공급하여 가공물의 품질과 표면조도에 직접적인 영향을 주는 장치이다. 고압의 절삭유를 토출 시 가공물의 품질의 척도인 표면조도가 향상된다. 고압의 절삭유가 토출이 가능한 다단원심펌프의 성능향상을 위해 기존에는 단의 수를 높이는 방법과 임펠러의 형상을 최적화하여 성능향상을 진행하였다.^[5-8] 그러나 펌프의 단을 높게 제작할수록 고출력의 모터가 필요하며, 임펠러의 형상 최적화만으로 펌프의 성능향상에 어려움이 있으며, 또한 복잡해진 형상으로 CFD해석을 통한 펌프 성능예측에 어려움이 있다.

본 연구에서는 기존 성능향상 방법이 아닌 펌프 케이싱 구조개선을 통한 성능향상에 대해 연구를 진행하였다. 성능향상을 검증하기 위해 해석 소프트웨어인 ANSYS 19.2 FLUENT 앱을 이용하여 기존 펌프인 Pump A에 대한 CFD해석의 신뢰성을 검증 후에 검증된 CFD해석기법을 통해 펌프 케이싱을 개선 펌프인 Pump B에 대하여 CFD해석을 진행하여 성능향상을 분석하고자 한다.

2. 해석 신뢰성검증

2.1 유체모델링 및 CFD해석

펌프의 CFD해석을 진행하기에 앞서 유체층 모델링을 진행하여야 하며, 펌프의 작동원리는 모터를 통해 임펠러가 회전하였을 때, 발생 되는 압력으로 유체가 이동하여 토출되는 원리이다. 따라서, 펌프의 CFD해석을 진행하려면 임펠러 주위를 Fig. 1과 같은 회전하는 유체층과 Fig. 2와 같은 비회전 유체층을 따로 모델링을 진행하여야 한다.

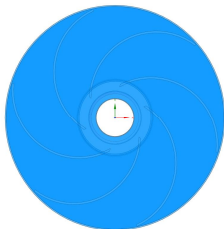


Fig. 1 Impeller Fluid 3D Modeling

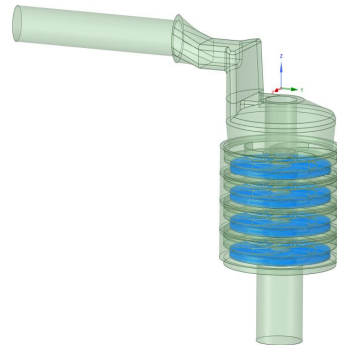


Fig. 2 Pump Fluid 3D Modeling

CFD해석의 정확성 향상을 위해 유체 모델링을 기존에 삼각격자와 사각격자로 해석격자를 생성하는 것을 각 격자의 중점을 연결하여 생성하는 육각해석격자로 변경하였으며, K-EPSILON Standard 난류모델과 K-OMEGA Standard 난류모델을 결합한 모델로 벽면 근처에는 K-OMEGA Standard 난류모델을 적용하고, 경계층 끝 단 자유 스트림구간에서 K-EPSILON Standard 난류모델을 적용하여 보다 신뢰성이 높은 결과를 도출이 가능한 K-OMEGA SST 난류모델을 적용하였다.^[9-12]

Fig. 3은 기존 펌프의 육각해석격자를 미적용한 결과이며, Fig. 4는 육각해석격자를 적용한 결과이다. 기존 CFD해석에 비해 개선된 CFD해석의 정확성을 검증하고자 기존 CFD해석에 진행되는 해석격자와 생성된 해석격자의 중점을 연결한 육각격자의 CFD해석결과를 비교분석을 진행하기 위해 CFD해석 조건으로 펌프성능을 확인할 때 적용하는 실험방법을 적용하여 진행하였다.

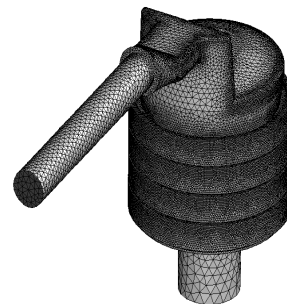


Fig. 3 Hexagon Mesh Unapplied

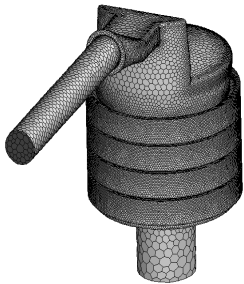


Fig. 4 Hexagon Mesh Apply

펌프성능실험방법은 펌프 토출구와 연결된 배관 밸브의 개폐로 압력 조절을 통해 펌프의 양정 및 성능을 확인하며, 압력계가 1bar를 나타낼 때, 양정 10m로 나타낸다. Pump A의 CFD해석 경계 조건으로 Table1과 같으며, Pump A는 침수식 펌프로 동작기계의 절삭유탱크내에 설치되어 사용되는 펌프이며, 입구압력조건은 0이다. 사용 유체는 절삭유로 유체의 밀도는 960kg/m^3 와 유체의 점성은 $0.001003\text{kg/m} \cdot \text{s}$ 이다. 임펠러의 회전 방향은 평면으로 보았을 때, 반시계 방향으로 3,300RPM으로 회전 조건을 입력하였다. 양정 2 ~ 40m의 조건일 때, Pump A의 CFD해석을 진행하였다. 해석결과 임펠러 벽면 주위의 속도를 확인 한 결과 육각격자 미적용 해석결과는 Fig. 5와 같이 나타났으며, 육각격자 적용 해석결과 Fig. 6과 같이 확인되었다. 육각격자 적용해석결과는 육각격자 미적용 해석결과에 비해 최대 속도가 차이가 낮으며, 전체적인 묘사된 결과만으로 어려웠으나 Fig. 7과 같은 펌프 성능그래프를 확인한 결과 육각격자를 적용하여 진행한 CFD 해석결과가 기존 격자를 적용한 CFD해석결과에 비해 최대 2.5%, 평균 1.965% 낮은 결과로 확인할 수 있었다.

Table 1 Boundary Conditions

Boundary Condition	
Material	Cutting Oil
Density	960kg/m^3
Viscosity	$0.001003\text{kg/m} \cdot \text{s}$
Revolutions	3,300RPM
Pressure Inlet	0
Pressure Outlet	20,000 ~ 400,000Pa

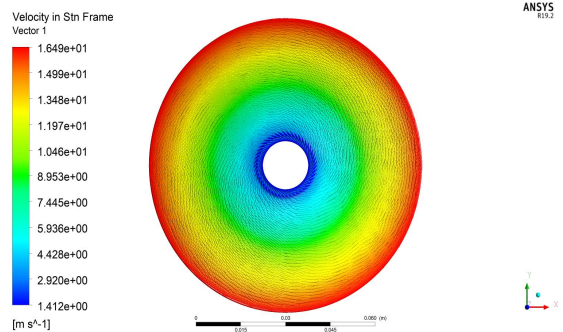


Fig. 5 Analysis Result(Hexagon Mesh Unapplied)

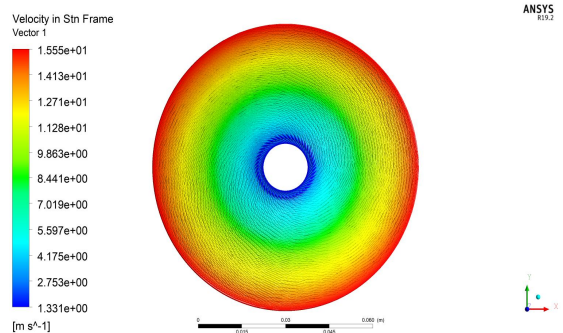


Fig. 6 Analysis Result(Hexagon Mesh Apply)

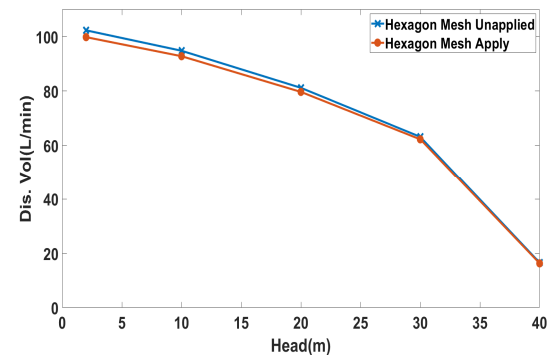


Fig. 7 Pump A Performance Graph

2.3 실험검증

육각해석 격자 적용에 따른 CFD해석결과의 신뢰성 검증을 진행하기 위해 펌프를 시제작하여 펌프성능실험을 진행하였다. 펌프성능실험을 위한 구성은 Fig. 8과 같다. CFD해석조건과 마찬가지로

압력차이를 주기 위하여 밸브 개폐를 통해 압력을 조절하여 압력계에 표시된 압력에 해당하는 양정의 값에 따른 토출량을 기록하여 실험값과 해석값의 비교를 통해 CFD해석 신뢰성 검증을 진행하였다. 펌프성능의 실험결과 및 해석결과는 Table 2와 같으며, 오차율은 육각격자 미적용 해석결과는 최대 6.452%, 최소 4.217%, 평균 5.324% 오차율을 갖는 것으로 확인되었으며, 육각격자를 적용하였을 때, 최대 4.108% 최소 2.454%로 평균 3.465% 오차율이 확인되어 육각격자를 적용하였을 때, CFD해석결과가 정확성이 증가 됨을 확인할 수 있었다. Fig. 9와 같이 펌프성능그래프로 비교하였을 때, 양정이 상승할수록 해석결과와 실험결과와의 토출량의 오차가 감소 됨을 확인할 수 있었으며, 육각격자 적용 CFD해석기법이 신뢰성이 향상된 기법으로 정의할 수 있었다.

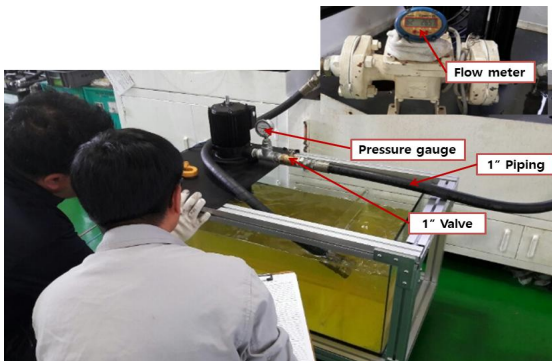


Fig. 8 Pump Performance Test Configuration

Table 2 Comparison of Experimental value and Interpretation value

Total Head(m)	Hexagon Mesh Unapplied Value(L/min)	Hexagon Mesh Apply Value(L/min)	Experimental Value(L/min)
2	102.3	99.8	95.7
10	94.8	92.8	89.2
20	81.2	79.7	76.9
30	63.2	62.3	60.2
40	16.6	16.3	15.9

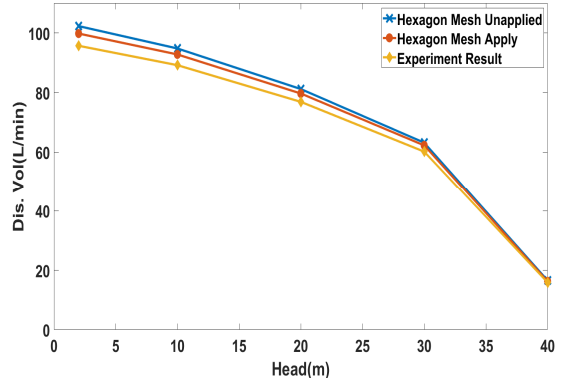


Fig. 9 Pump Performance Graph(Interpretation and Experimental)

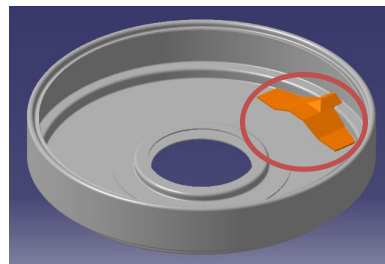


Fig. 10 Improve Pump B Casing

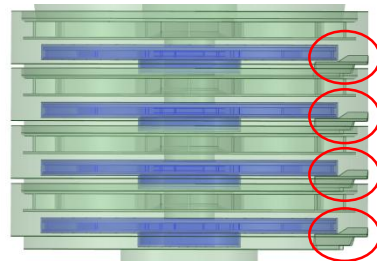


Fig. 11 Improve Pump B Fluid Modeling

3. 성능개선

3.1 모델링

기존 성능개선 방법이 아닌 다단펌프의 각 케이싱마다 구조물을 추가하여 Fig. 10과 같이 설계하여 펌프케이싱을 구조개선하였다. 개선된 Pump B의 성능을 예측하기 위해 Fig. 11과 같이 유체모델링을 생성하였다.

3.2 CFD해석

검증된 CFD해석기법을 적용하여 Pump A와 동일한 CFD해석조건으로 진행하여 기존 Pump A와 개선된 Pump B와 비교분석하였다. 펌프의 성능향상을 분석하기 위해 기존 Pump A와 개선 Pump B의 4단 임펠러의 압력을 비교한 결과 Fig. 12와 Fig. 13과 같이 차이를 확인할 수 있었으며, 펌프 케이싱 구조개선으로 순간적으로 구조물 근처에서 압력이 감소하였으나 구조물과 유체가 충돌 이후 압력이 상승하여 전체적으로 임펠러 압력이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 유체의 속도영향을 확인하기 위해 임펠러 4단의 벽면의 속도를 비교 분석한 결과 Fig. 14와 Fig. 15와 같이 펌프케이싱 구조개선으로 유체의 흐름에 영향을 주어 Pump B의 유체속도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

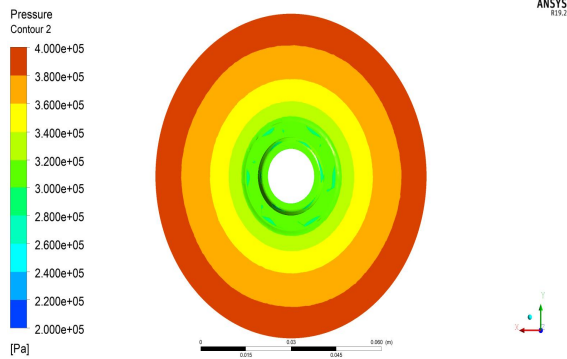


Fig. 12 Pump A Analysis Result(Pressure)

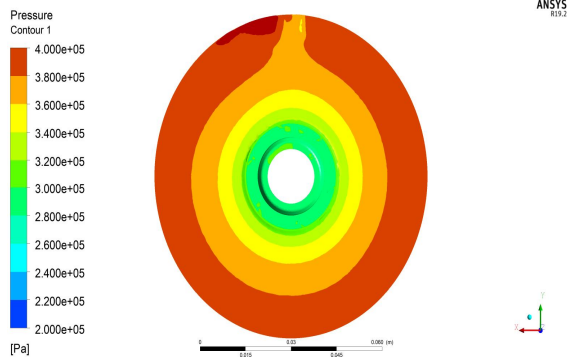


Fig. 13 Pump B Analysis Result(Pressure)

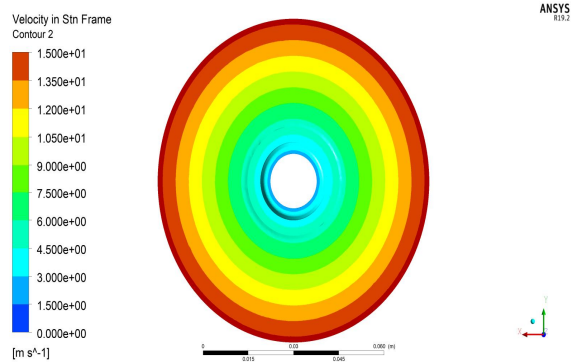


Fig. 14 Pump A Analysis Result(Velocity)

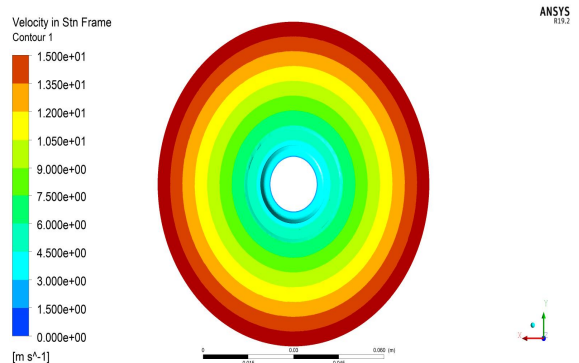


Fig. 15 Pump B Analysis Result(Velocity)

기존모델인 Pump A의 해석결과, 실험결과, 펌프케이싱을 구조개선한 Pump B의 해석결과를 Table 3과 같으며, 기존 Pump A의 해석값 대비 개선 Pump B의 해석값의 성능효율은 최소 16.4%에서 최대 27.6% 성능이 향상되었으며, 평균 20.77%의 성능이 향상되었으며, Table 3을 펌프성능그래프로 비교한 결과는 Fig. 16과 같으며, 양정 30m 이후 급격하게 펌프의 성능이 감소됨을 확인할 수 있었으며, 펌프케이싱의 구조개선으로 펌프 내 유체가 각 케이싱을 이송할때마다 기존에 비해 원활하게 이송하여 다단원심펌프의 성능이 향상되었으며, 기존의 설계방법으로 임펠러의 형상 변경이 아닌 다른 성능향상방법으로 펌프케이싱의 구조개선을 통한 펌프의 성능향상을 확인할 수 있었다.

Table 3 Comparison of Experimental value and Interpretation value

Total Head(m)	Pump A Analysis Value(L/min)	Pump A Experimental Value(L/min)	Pump B Analysis Value(L/min)
2	99.8	95.7	116.2
10	92.8	89.2	109.4
20	79.7	76.9	95.2
30	62.3	60.2	76.3
40	16.3	15.9	20.8

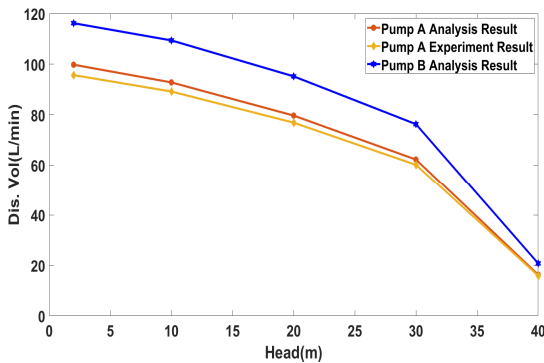


Fig. 16 Pump Performance Comparison Graph

4. 결론

CFD해석의 신뢰성 향상을 위해 해석격자를 육각 격자로 변경하여 CFD해석을 진행하였으며, CFD해석의 신뢰성 검증을 위해 펌프를 시제작하여 검증한 결과 육각격자의 미적용 CFD해석결과는 평균 오차를 5.324%로 나타났으며, 육각격자 적용 CFD해석으로 평균오차를 3.465%로 육각격자 미적용보다 오차가 감소 되었다. 검증된 CFD해석기법을 적용하여 기존에 성능개선 방법인 임펠러 구조개선이 아닌 펌프케이싱 구조개선으로 평균 20.77% 성능이 향상되었다.

후 기

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(2021).

REFERENCES

1. Kim, W.-K., Kim, K.-H., Won, J.-H., "A Study on the Precision Machining Characteristics of Aluminium 7075 and Silicon using Ultra-precision Turning Machine", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, No. 4, pp. 27-32, 2006.
2. Akira, K., "Development of ultra-precision machine tools with high-stiffness," JSPE, Vol. 61, No. 12, pp. 1671-1676, 1995.
3. Geyl, R., "Design and Farication of Three Mirror Flat Field Anastigmat for High Resolution EarthObservation," SPIE, Vol. 2210, pp. 739-745, 1994.
4. Ikawa, "Utraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future," CIRP Annals, Vol. 40 Issue. 2, pp. 587-594, 1991.
5. Guo, M., Choi, Y.-D., "Optimum Design on the Meridional Shape of a Multistage Centrifugal Pump Impeller for Performance Improvement", The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 3, pp. 41-48, 2019.
6. Kim, S., Choi, Y.-S., Yoon, J.-Y., Kim, D.-S., "Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE", The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 36-42, 2008.
7. Cho, W.-W., Kang, T.-W., "Optimizing Design Factors of Centrifugal Pump Impeller through CFD Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 27, No. 2, pp. 125-131, 2019.
8. Lee, S.-H., Lee, D.-R., "Flow Analysis of The Impeller With Different Inlet Angles in The Centrifugal Pump", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 58-63, 2016.
9. Kim, J.-H., Cho, B.-M., Kim, S., Lee, Y.-K., Choi, Y.-S., "Steady and Unsteady Flow Characteristics of a Multi-stage Centrifugal Pump

- under Design and Off-design Conditions”, International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 64-70, 2019.
10. Ahmed, E.-H., Muhammed E., Mohammed M., Karim M., “Numerical Study of an Unbalanced Oil Vane Pump Using Shear Stress Transport (SST) $k - \omega$ Turbulence Model”, Recent Advances in Engineering Mathematics and Physics, pp. 87-98, 2020.
 11. Lee, B.-S., Kim, T.-Y., Park, Y.-W., Lee, D.-H., “Numerical Simulation of Square Cylinder near a Wall with the ε -SST Turbulence Model,” Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Science, Vol. 31, No. 8, pp. 1-7, 2003.
 12. Ahn, D.-I., Kim, H.,-G., “Numerical Study on Submersible Pumps with a Vortex Reduction Function”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 10, pp. 83-92, 2019.