



유동해석을 통한 소형 터보압축기 성능 개선 설계에 관한 연구

김 승 민^{*1}A STUDY ON IMPROVED DESIGN OF SMALL SIZE TURBO-COMPRESSOR
USING COMPUTATIONAL FLUID ANALYSISKim Seung Min^{*1}

This study presents the design of small size turbo-compressor to increase the performance using computational fluid analysis. A three dimensional computation was conducted changing the main parameters of impeller blade and diffuser shape, respectively, and the design was performed on a basis analysis of result of that. As a result, the Improved shapes show the increase of efficiency in comparison with the existing shape. This study will be used as useful reference data to establish the design concept of the small size turbo-compressor and to improve its performance.

Key Words : 개선 형상(Improved Shape), 소형터보압축기(Small Size Turbo-Compressor), 임펠러 블레이드 (Impeller Blade), 디퓨저 형상(Diffuser Shape)

1. 서 론

원심압축기는 터보형 압축기의 한 종류로서 축방향으로 흡입되는 작동유체가 임펠러를 통과하면서 반경방향으로 선회하여 전압력을 상승시키고, 임펠러 출구에서의 운동에너지를 디퓨저에서 확산시켜 정압으로 전환시키면서 압력을 상승시키는 작동 유체를 압축하는 핵심적인 구성품이다. 가스터빈, 산업용 공기압축기, 대형터보냉동기, 터보차저, 고압송풍기 등의 산업분야에서 널리 사용되고 있으며, 급속히 변화하는 시장을 선점하고 시장 환경에 유연하게 대처하기 위해서는 개발 기간 단축 및 비용 절감이 필수적이다. 정확하고 신뢰성이 확보된 3차원 유동해석에 의한 터보압축기의 성능 평가는 개발과정에서 많은 비용과 시간 그리고 인력을 필요로 하는 시제품시험 의존도를 효과적으로 대체할 수 있는 유력한 방법 중의 하나이며, 이에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다[1,2]. 1980년 Eckardt는 형상이 각각 다른 임펠러에 대해 임펠러 내부 유동장 및 압력 분포, 임펠러 성능 등에 대해 상세히 수행

하였으며[3], 그 결과를 토대로 수치해석 코드의 계산 검증자료로 활용되고 있다. 선진국에서는 축적된 설계 기술을 바탕으로 최신의 3차원 유동해석 기술을 응용하여 보다 신속하고 효율적인 제품 개발을 수행하고 있다[4].

해가 거듭할수록 소비자는 다양한 기능과 아울러 고효율의 제품을 요구하고 있으며 이러한 흐름 속에서 많은 분야에 대해 3차원 유동해석을 이용한 연구가 수행되고 있다. 최근 연구 사례로, 천음속 압축기에 대한 설계 및 유동장 분석을 수행한 후, 시험 결과와 비교한 연구 내용이 있으며[5], 베지어 다항식에 최적설계 개념을 도입하여 효율을 증가시키는 설계 기법이 제안된 사례 등이 있다[6], 또한, 유량대 압력비의 기울기를 목적함수로 사용하여 서진마진 증가를 고려한 최적화 설계에 대한 연구가 수행되었으며[7], 선박용 터보차저에 적용되는 디퓨저에 대한 최적 설계에 대한 연구[8], 수치해석을 통한 2차원 임펠러의 최적 설계에 대한 연구 등이 수행되었다[9].

한편, 휴대 가능한 더 강력한 소형 에너지원에 대한 요구에 따라 소형 터보압축기의 시장이 점차 증대되고 있는 추세에 있으며, 특히, 소형 터보압축기의 경우, 미세한 형상 변화가 상대적으로 성능에 큰 영향을 미치므로 고효율 달성을 위한 최적화 설계 기법의 필요가 요구되고 있다. 본 연구에서는

1 삼성테크윈(주) R&D센터 에너지장비개발팀

* TEL : 070) 7147-4187

* E-mail: gopmi.kim@samsung.com

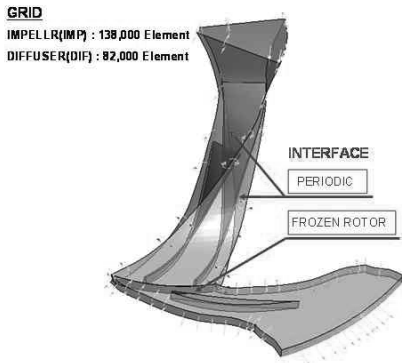


Fig. 1 Computational Grid System

3차원 유동해석을 이용하여 각 설계인자들이 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 토대로 소형 터보압축기 성능을 향상시키고자 한다.

2. 해석모델 및 수치해석 기법

2.1 해석 모델

본 연구를 통해 성능을 개선하고자 하는 소형 터보압축기에 적용되는 설계점에서의 무차원 변수는 다음과 같다.

- Flow Coefficient = 0.115
- Head Coefficient = 0.631

2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 압축성 난류 유동해석을 위해 터보기계의 유동해석에 주로 사용되는 상용 프로그램인 CFX-11을 사용하였다[10]. 수치해석을 위해 압축성 정상상태 유동으로 가정하였으며 계산의 수렴 판단은 연속방정식, 에너지 방정식, 모델링 방정식의 무차원 잔류량 값이 10⁻⁴이하로 설정하였다.

2.2.1 경계 조건

입구의 경계조건은 성능시험과 유사하게 전압력, 전온도를 설정하였고, 출구에서는 질량유량을 경계조건으로 선정하여 이를 바꾸어가며 유량을 조절하였다[11]. 임펠러와 디퓨저는 블레이드와 베인이 주기적으로 배치되어 있으므로, 블레이드와 베인의 피치를 고려하여 단일 유로로 해석하고 주기면에는 주기조건을 적용하였다. 또한, 임펠러와 디퓨저가 경계하는 면에는 원심압축기에 대한 선행연구 결과[12], 실험치와 잘 일치한 결과를 보여준 Frozen Rotor 조건을 사용하였다.

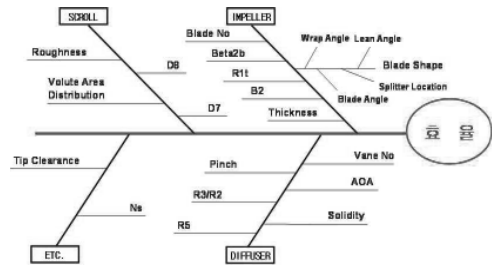


Fig. 2 Fish Bone Diagram of Design Parameters

2.2.2 난류모델 선정

난류모델은 유동의 중요한 영향을 미치며, 유동에서 관성력이 점성력에 비해서 두드러지게 클 때 발생한다. NASA에서 출판된 난류모델에 따른 해석검증에 관한 보고서[13]는 SST 난류 모델이 다양한 유동 형태에서 가장 유동특성을 잘 묘사하여 유동박리를 예측하는 능력이 가장 뛰어나기 때문에 가장 적합한 난류모델로 소개하고 있다. 따라서 본 연구에서는 SST 난류모델을 해석기법으로 결정하였으며, SST 난류모델은 예측성능이 벽에 가장 가까운 점의 위치에 의존함으로 y+가 2 이내가 되도록 격자를 형성하도록 한다[14].

2.2.3 해석 격자의 구성

격자 의존성 평가를 통해 임펠러 한 개의 유로와 디퓨저 한 개의 유로를 각각 14만개, 8만개 정도로 격자를 구성하였으며, 임펠러 전방이 대기조건으로부터 디퓨저 출구의 2차 베인리스 구간까지를 해석 격자로 구성하였다. 팁 간극은 0.2mm로 동일하게 적용하였으며, Fig. 1에 해석 격자의 구성과 경계조건 등을 도시하였다.

3. 설계인자에 따른 성능 변화 분석

3.1 설계인자 선정

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 성능에 영향을 미치는 임펠러 블레이드와 디퓨저 형상에 대한 설계인자를 도출한 후, 각 설계인자에 대해서 분석을 수행하였다.

팁 간극은 감소할수록 효율이 증가됨은 이미 확인된 내용이며[15], 각 부분의 표면조도에 의한 성능 변화도 확인된 내용이다[16]. 임펠러 블레이드의 두께는 압력 손실을 증가시키므로 두께가 감소할수록 성능 측면에서 유리하며[17], 이에 따라 구조적 안정성을 갖는 최소 두께로 설계를 수행하는 것이 바람직하다. 따라서, 본 연구에서는 팁 간극, 표면조도 및 임펠러 블레이드 두께에 대한 성능 분석은 제외하였다. 또한, 스크롤에 의한 성능 변화는 미소할 것으로 가정하여 스크롤 설계인자에 대한 분석도 본 연구 범위에서는 제외하였다.

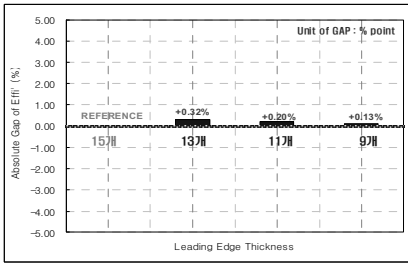


Fig. 3 Results of Analysis According to Vane Number

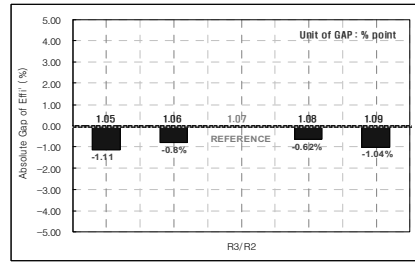


Fig. 5 Results of Analysis According to R3/R2

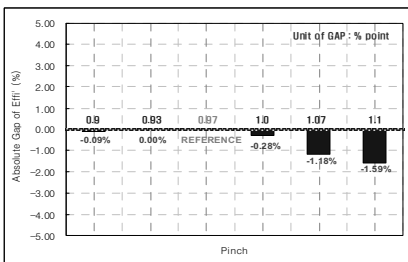


Fig. 4 Results of Analysis According to Pinch

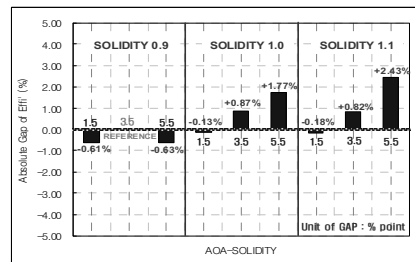


Fig. 6 Results of Analysis According to AOA-Solidity

3.2 디퓨저 설계인자에 의한 성능 변화 분석

디퓨저의 설계인자로 베인 수, Pinch, R3/R2, AOA, Solidity 등을 설계인자로 선정하였으며, 하나의 인자에 대한 성능분석을 위해 나머지 4개의 인자는 일정하게 유지하였다.

3.2.1 베인 수 변경에 대한 성능 변화 분석

베인 수를 9개에서 15개까지 변화시키면서 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 3와 같이 베인 수 변경에 따른 효율 변화는 1% 미만이며, 베인 수가 감소할수록 최대압력비와 최대효율은 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 따라서 공진을 충분히 회피할 수 있는 베인 수 중 최소의 베인 수를 선정하는 것이 유리하다.

3.2.2 Pinch 변경에 대한 성능 변화 분석

Pinch를 0.9에서부터 1.1까지 변화시키면서 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 4와 같이 Pinch는 0.93~0.97 일 때, 효율이 증가될 수 있음을 확인하였으며, Pinch 값을 감소시킬수록, 최대압력비와 최대효율은 증가하는 경향이 있다. 베인의 높이를 블레이드의 높이보다 증가시키는 역 Pinch는 성능이 낮아지는 경향이 있다.

3.2.3 R3/R2 변경에 대한 성능 변화 분석

R3/R2를 1.05에서 1.09까지 변화시키면서 성능분석을 수행

하였다. 그 결과, Fig. 5와 같이 R3/R2 값이 1.07일 때, 효율이 가장 높음을 확인하였으며, R3/R2 값이 감소할 때보다 증가할 때, 효율 저하가 상대적으로 작게 나타난다. 임펠러 블레이드 형상에 따라 최적의 R3/R2 값은 상이할 수 있으므로, 모델에 따라 성능 분석이 별도로 필요할 것으로 판단된다.

3.2.4 AOA 및 Solidity 변경에 대한 성능 변화 분석

Solidity 0.9, 1.0, 1.1 각각에 대하여 AOA 1.5도, 3.5도, 4.5도를 적용하여 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 6과 같이 Low Solidity Diffuser(LSD)인 경우는 3.5도 일 때 효율이 가장 높았지만, High Solidity Diffuser(HSD)의 경우는 AOA가 증가할수록 효율이 증가함을 확인하였다. 따라서, HSD가 LSD에 비해 성능에서 유리하며, 특히, AOA가 증가할수록 효율은 더욱 증가됨을 확인하였다. 최대압력, 최대효율 측면에서도 HSD가 유리하지만, 작동영역은 감소될 우려가 있다.

3.3 임펠러 설계인자에 의한 성능 변화 분석

임펠러 블레이드의 설계인자로 블레이드 뒤편각, 축방향 길이, 스플리터 위치 입구 마하수 등을 선정하여 분석을 수행하였다. 임펠러 반경(R2), 블레이드 출구폭(B2), 임펠러 쉬라우드 반경(R1t), 임펠러 허브 반경(R1h) 등의 외곽치수는 유량과 압력비에 따라 제한을 갖게 되므로 분석 대상에서 제외하였다.

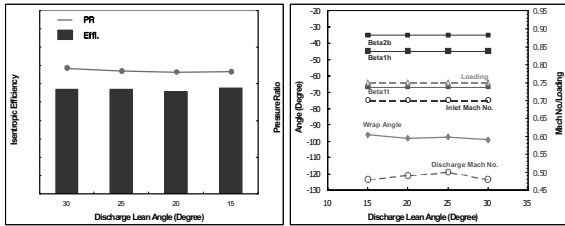


Fig. 7 Result of Analysis According to Lean Angle

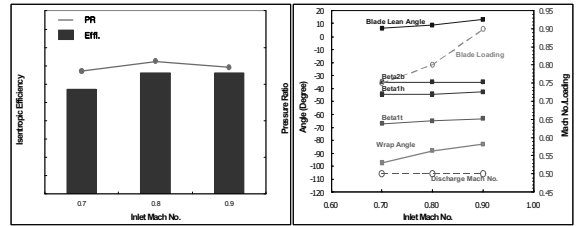


Fig. 10 Result of Analysis According to Blade Loading

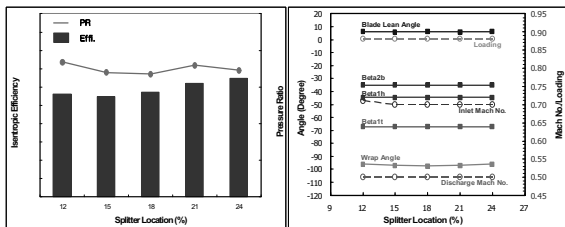


Fig. 8 Result of Analysis According to Splitter Location

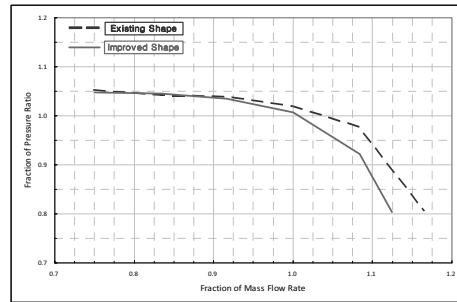


Fig. 11 Performance Curve of Pressure Ratio

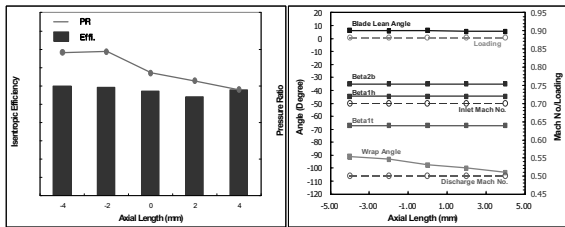


Fig. 9 Result of Analysis According to Axial Length

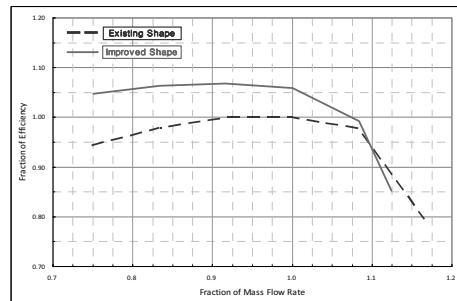


Fig. 12 Performance Curve of Adiabatic Efficiency

3.3.1 블레이드 뒹힘각 변경에 대한 성능 변화 분석

블레이드 뒹힘각을 15도에서 30도까지 변화시키면서 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 7과 같이 블레이드 뒹힘각은 다른 인자들과 교호관계에 있지 않으며, 본 설계에서는 성능에도 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

3.3.2 스플리터 위치 변경에 대한 성능 변화 분석

스플리터의 위치를 인두서 위치로부터 후방 12%에서 24%까지 변화시키면서 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 8과 같이 스플리터의 위치는 다른 인자들과 교호관계에 있지 않음을 확인하였으며, 스플리터를 전방에 위치시키는 것보다 18~24% 부근에 위치시켰을 때, 압력비와 효율 측면에서 유리함을 확인하였다. 단, 깃면 하중과 마하수 분포는 스플리터의 위치에 따라 영향을 받지만, 최대 하중 값과 입출구에서의 마하 수에는 영향을 받지 않는다.

3.3.3 축방향 길이 변경에 대한 성능 변화 분석

축방향 길이를 기존 형상 기준 -4mm부터 +4mm까지 변화시키면서 성능 분석을 수행하였다. 그 결과, Fig. 9와 같이 축방향 길이는 감긴각과 교호관계에 있으며, 효율에 큰 영향을 미치지 않으나, 긴 경우보다 짧은 경우 압력비 측면에서 유리함을 확인하였다.

3.3.4 입구 마하수 변경에 대한 성능 변화 분석

입구 마하수도 블레이드 각과 내부유로 조정을 통해 0.7부터 0.9까지 변경시키면서 이에 대한 성능 변화를 검증하였다. 그 결과, Fig. 10과 같이 입구 마하수는 깃면 하중, 감긴각과 교호관계에 있으며, 어느 일정 수준까지 값이 증가할수록 압



력비와 효율 측면에서 유리함을 확인하였다. 설계 모델에 따라 정도의 차이가 있을 수 있지만 0.8 정도의 수준이 적절할 것으로 판단된다.

3.4 성능 개선 설계 결과

설계유량에서의 압력비를 비롯한 압력마진 및 작동영역은 기존 형상과 1% 미만의 차이를 갖도록 R2, B2, R1t, R1h 등의 외곽치수를 선정하였으며, 임펠러 블레이드와 디퓨저 형상에 대한 설계인자 분석을 토대로 성능 개선 설계를 수행하였다. 설계된 형상에 대하여 기존 형상과 동일한 수치해석 기법으로 3차원 유동해석을 수행하였으며, 그 결과를 기존 형상과 3차원 유동해석 결과를 비교하여 유량에 따른 압력비 및 효율 성능 곡선을 각각 Fig. 11와 Fig. 12에 도시하였다. 단, 유량, 압력비, 효율 등은 설계점을 기준으로 비율로 도시하였다.

Fig. 11에서 나타나듯이 기존 형상과 설계점 기준 1% 미만의 압력비, 압력마진, 작동영역을 가지고 있음을 검증하였으며, Fig. 12와 같이, 효율에 대한 성능곡선 비교 결과, 설계점부터 저유량 영역에서는 기존 형상 대비, 5% 정도 증가하였음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형 터보압축기의 성능 향상을 위해 각 설계인들이 성능에 미치는 영향을 3차원 유동해석을 통해 분석하였다. 디퓨저에서는 베인 수, Pinch, R3/R2, AOA, Solidity 등 5개, 임펠러 블레이드에서는 블레이드 뒤편각, 스플리터 위치, 축방향 길이, 입구 마하수 등 4개의 설계인자들을 선정하였으며, 각각의 설계인자들을 변화시키면서 각 설계인들이 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 각 설계인들의 분석 결과를 토대로 설계를 수행하였으며, 그 결과 기존 형상과 유사한 압력비와 유량 범위에서 기존 대비 5.0% 수준의 효율 개선이 가능함을 확인하였다.

본 연구를 통해 설계인들이 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 토대로 소형 터보압축기의 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 2005, 남삼식, 외5인, "터보 압축기 임펠러-디퓨저 운동장에 대한 정상상태 해석," *유체기계공업학회 2005년도 연구개발 발표회 논문집*, pp.405-412.
- [2] 2009, 강영석, 외2인, "수치해석 및 성능시험을 통한 원심 압축기 성능 평가," *한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집*, pp.341-344.
- [3] 1976, Eckardt, D., "Detailed Flow Investigations Within a High Speed Centrifugal Compressor Impeller," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.98, pp.390-402.
- [4] 1995, 강신형, "원심압축기의 설계 개발을 위한 CFD의 응용과 전망," *한국전산유체공학회 1995년도 추계 학술대회 논문집*, pp.12-28.
- [5] 2008, 최재호, "천음속 원심압축기의 공력설계 및 수치해석," *한국추진공학회지*, Vol.12, no.4, pp.56-62
- [6] 2008, 김진혁, 외1인, "자오면 형상을 고려한 원심압축기 임펠러 최적 설계," *2008년도 유체기계연구개발 발표회 논문집*, pp.385-390.
- [7] 2008, 최재호, "서지 마진 증가를 고려한 원심 압축기 설계 최적화," *유체기계공업학회지:유체기계저널*, Vol.11, No.2, pp.38-45.
- [8] 2008, 김홍원, 외2인, "선박용 터보차저의 원심압축기의 디퓨저 형상변경에 따른 성능비교 및 유동특성 평가 연구," *유체기계저널*, Vol.1, No.2, pp.55-63.
- [9] 2008, 박한영, 외4인, "임펠러의 유로 면적비가 2차원 원심압축기의 성능에 미치는 영향," *유체기계공업학회지:유체기계저널*, Vol.11, No.5, pp.22-29.
- [10] 2006, ANSYS CFX, Release 11.0, *CFX-11 Documentation*.
- [11] 2009, 강영석, 외2인, "수치해석 및 성능시험을 통한 원심 압축기 성능 평가," *한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집*, pp.341-344.
- [12] 2005, Choi, J.H., Sung, O.S., Chen, S.B. and Lim, J.S., "Numerical and Experimental Investigation on a High Pressure Ratio Centrifugal Compressor," *ASME GT2005-68679*.
- [13] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T.J., "Turbulence Modeling Validation, Testing and Development," *NASA Technical Memorandum 110446*.
- [14] 2003, Menter, F.R., Ferreira, C.J., Esch, T. and Konno, B., "The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Prediction in Gas Turbines," *International Gas Turbine Congress 2003 Tokyo*, IGTC 203-TS-059.
- [15] 2005, 강신형, 외1인, "R134a 터보냉동기용 원심압축기의 익단간극이 성능특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구," *대한기계학회논문집B*, Vol.29, No.9, pp.971-978.
- [16] 2007, 김승민, "표면 조도를 이용한 3차원 유동해석을 통한 원심형 압축기의 성능 모사에 대한 연구," *CFX 컨퍼런스 발표 논문집*.
- [17] 1998, 강신형, 외3인, "초소형 원심압축기의 날개 두께 변화에 따른 성능에 관한 실험적 연구," *98 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp.135-141.