



디퓨저 깃배치각의 변화에 따른 원심압축기의 공력성능 특성에 관한 수치 연구

박태규,¹ 정인수,¹ 정희택,^{*2} 박준영,³ 김세미,⁴ 백제현⁵

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE STAGGER ANGLE ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCES IN THE VANED DIFFUSER OF A CENTRIFUGAL COMPRESSOR

T.G. Park,¹ I.S. Jung,¹ H.T. Chung,^{*2} J.Y. Park,³ S.M. Kim⁴ and J.H. Baek⁵

In the present study, the effects of the stagger angles on the aerodynamic performances in the vaned centrifugal compressor has been investigated by CFD methods. The diffuser vane angles were varied in the range of ± 10 deg. from the initial-design points. The commercial Navier-Stokes solver, ANSYS-CFX were applied to solve the impeller-diffuser flowfields. Through the numerical results, the desirable setting angles were proposed to fit the best performance to the variation of the operating conditions.

Key Words : 공력성능(Aerodynamic Performance), 깃 배치각(Stagger Angle), 원심압축기(Centrifugal Compressor), 디퓨저(Diffuser)

1. 서 론

산업용 터보기계에서 고압축용으로 사용되는 원심압축기는 임펠러와 디퓨저로 구성된다. 압력 회복성을 높이기 위해 디퓨저에는 유동 안내 깃을 채택하는 경우가 많다. 공력설계 단계에서는 설계점에서의 최적 효율을 위한 깃각을 결정하여 제품 제작 단계로 진행한다. 운전 조건에 따라 회전수나 유량의 변화에 따른 적절한 깃각은 성능시험 단계에서 구하는 것이 통상적이다. 이러한 기존 설계 절차에 CFD기법을 이용하면 시행착오를 줄이고 설계의 효율성을 증진할 수 있다.

원심압축기의 디퓨저의 주요 설계변수는 깃 형상, 깃수, 깃

배치각 등이다. 컴퓨터 하드웨어의 진보와 CFD해석기술이 개발됨에 따라 터보기계 내부의 3차원 비정상 압축성 유동 해석기법을 공력 성능 특성 분석에 적용하는 시도가 활발하다. 본 연구의 주제인 원심압축기의 디퓨저 공력 해석과 관련된 연구로는 베인 입구 반경, solidity, 입사각 등의 변수에 대해 회전 실속 방지의 관점에서 실험적 연구[1], 고압용 원심압축기에서 디퓨저의 깃수와 깃각이 성능 특성에 미치는 수치해석적 연구[2-3], 반응면기법을 이용하여 임펠러의 형상 개선과 디퓨저 깃수 변화에 따른 압축기의 최적화 과정에 수치기법을 적용한 연구[4] 등이 있다.

원심압축기의 디퓨저 베인각은 운전조건에 따라 변경할 수 있도록 설계되는 경우가 많다. 본 연구에서는 기존에 개발된 원심압축기에 대해 디퓨저 베인의 깃각 변화에 따른 공력성능 특성을 수치적으로 해석하고 이를 통해 적절한 배치각을 예측하는 시도를 하고자 한다.

2. 적용 모델 및 해석기법

2.1 적용 모델

1 경상대학교 기계공학과 대학원

2 종신회원, 경상대학교 기계공학과

3 정회원, 한국기계연구원

4 포항공과대학교 기계공학과 대학원

5 종신회원, 포항공과대학교 기계공학과

* TEL : (055) 751-6165

* Corresponding author, E-mail: htchungj@gnu.ac.kr

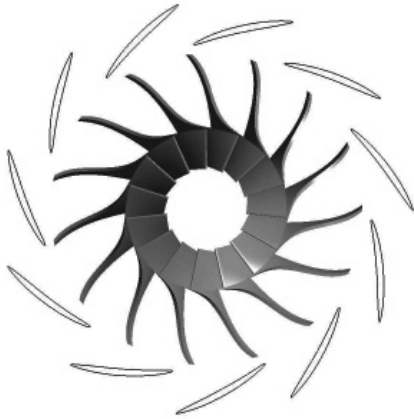


Fig. 1 Full 2-D View of the Impeller and Vane Geometry

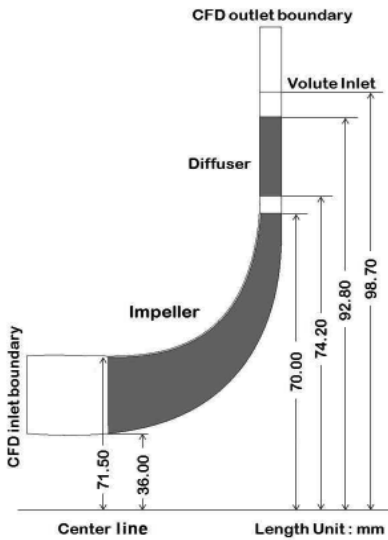
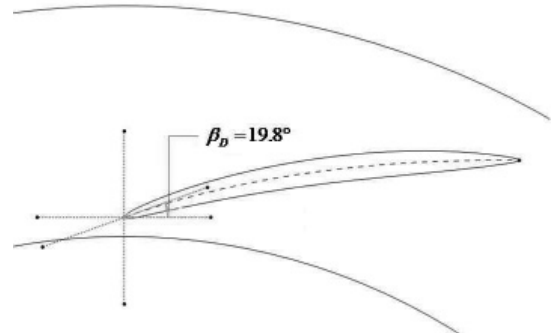


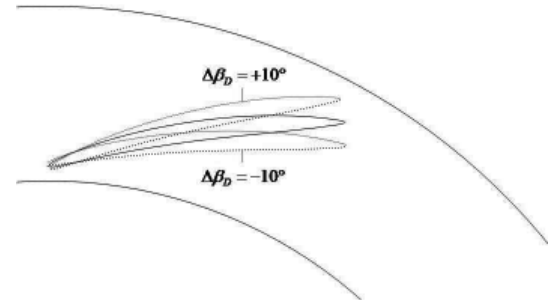
Fig. 2 Flow Path in the Meridional View

본 연구에서 적용한 모델은 250kw급 고온 발전용 연료전지시스템의 공기압축용 원심압축기이다. 설계조건은 유량이 0.30kg/s, 압력비는 2.34이며 임펠러의 회전수는 50,000rpm이다. 임펠러와 디퓨저 베인의 기본형상은 Fig. 1과 같고 자오면상의 유로 형상은 Fig. 2와 같다. 보다 상세한 내용은 참고문헌[4]에 기술되어 있다.

운전 중에 조정이 가능한 디퓨저의 경우 베인 날개의 무게 중심에서 각을 조정할 것이 일반적이다. 본 연구모델의 경우 임펠러와 디퓨저의 간격이 좁아 Fig. 3과 같이 날개의 선단을 회전 중심으로 두었다. 설계에서 결정된 베인의 깃배치각(stagger angle)은 19.8°이다. 이를 기준으로 하여 ±10° 범위에



(a) Initial Design Point



(b) Sketch of Different Stagger Angles

Fig. 3 Definition Sketch of Diffuser Vane with Different Stagger Angles

서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 분석하였다.

2.2 해석기법

본 연구의 해석 영역은 임펠러 입구에서 디퓨저 출구이다. 회전하는 임펠러와 고정된 디퓨저 사이에는 간섭 유동장이 형성되므로 원칙적으로는 압축성 3차원 비정상 Navier-Stokes 해석을 적용하여야 한다. 계산의 효율성을 위해 기존의 연구 결과[5]를 참조하여 임펠러 출구와 디퓨저 입구 사이의 인접면에는 원주방향의 평균값을 이용하는 혼합면기법(mixing-plane method)을 이용하였다. 터보기계 유동장에 주로 사용되는 $k-\omega$ SST 모델을 난류유동에 적용하였다.

유동해석을 위해서 열유동 범용해석 프로그램인 ANSYS사의 CFX solver와 Turbo 모듈[6]을 사용하였다. BladeGen과 Turbo-Grid를 이용하여 계산격자점을 생성하였다. Hexa형의 정규격자계를 채택하여, Fig. 4와 같이 임펠러에는 28만 개, 디퓨저에는 14만개의 계산격자점이 소요되었다. 유동장 입구

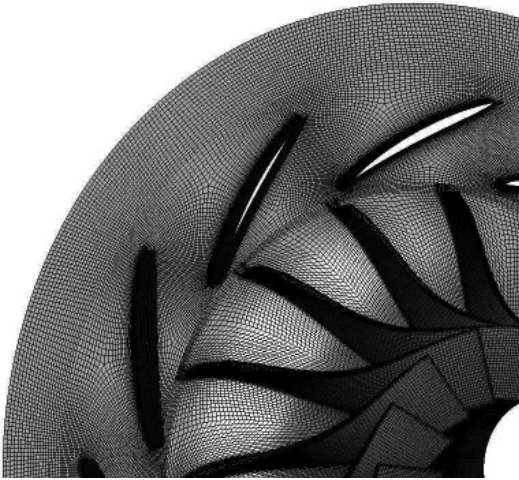


Fig. 4 Computational Meshes

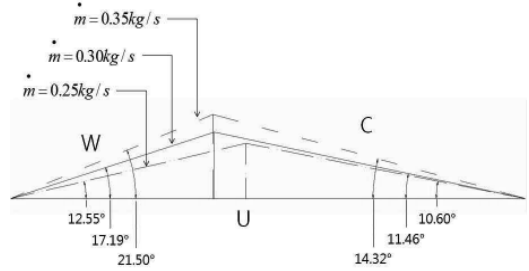


Fig. 6 Velocity Triangle at the Diffuser Inlet

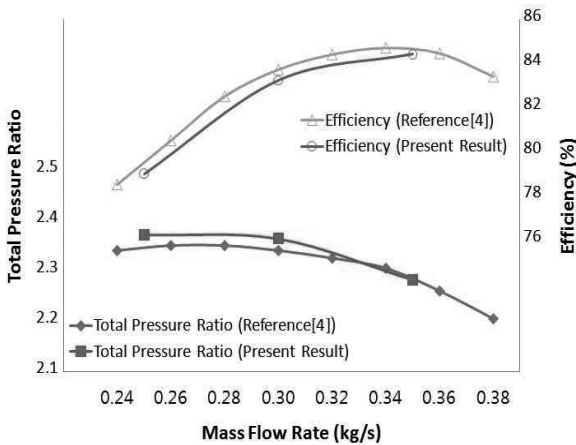


Fig. 5 Performance Curves with the Initial-design Stagger Angle

에는 전압력(total pressure)과 전온도(total temperature)가 주어지고 디퓨저 출구에는 유량(mass flow rate)을 입력조건으로 부여하였다. 벽면에는 점착조건(no-slip condition)이 부여되고 임펠러에는 회전속도가 주어진다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 시설계 깃배치각에서의 공력성능

설계에서 결정된 디퓨저의 깃배치각에 대해 설계기준 유량인 0.30kg/s를 100%로 하여 75%에서 125% 범위의 유량 변화에 대한 압축기의 공력성능 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 임펠러 입구와 디퓨저 출구를 기준으로 압력비는 전압비율이며

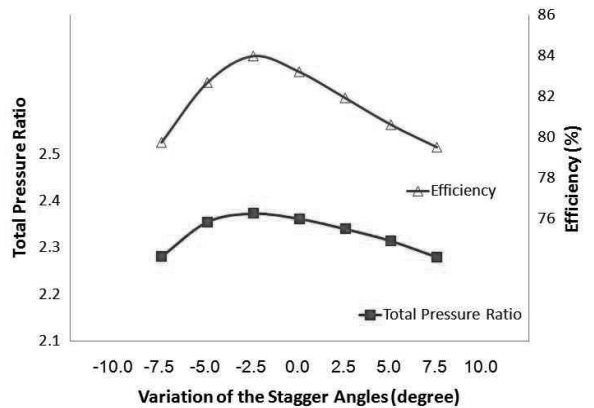


Fig. 7 Performance Curves with the Variation of the Stagger Angles $m=0.30\text{kg/s}$

효율은 등엔트로피 상태로 정의된다. 설계점에서의 압력비는 2.34로 예상치와 유사하고 효율은 83.5%로 고효율 성능을 나타낸다. 압력비는 설계점보다 약간 저유량에서 효율은 설계점보다 약간 고유량에서 최대값을 나타낸다.

유량변화에 따른 디퓨저 입구에서의 유동 조건을 속도삼각형으로 도시하면 Fig. 6과 같다. 유량이 감소할수록 디퓨저 입구의 유동각이 작아짐을 확인할 수 있다. 설계유량을 기준으로 저유량의 경우 -4.7° , 고유량의 경우 $+4.3^\circ$ 정도 유입각이 변한다. 따라서 디퓨저 입구부분에서 유동이 원활하도록 깃배치각을 조절할 필요가 있다.

3.2 깃배치각 변화에 따른 공력성능 변화

깃배치각을 설계배치각 기준으로 $\pm 10^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 3가지 유량 조건에서 해석하였다.

설계점($m=0.30\text{kg/s}$; 100%)에서의 압축기의 공력성능 결과는 Fig. 7과 같다. 압력비와 효율 모두 깃배치각이 -2.5° 에서 최고값을 보인다. 이 결과는 설계배치각은 19.8° 가 아니라 17.3° 이어야 함을 의미한다. 또는 실제 운전시 깃배치각을 -2.5° 로 조정하면 더 좋은 성능을 얻을 수 있음을 암시한다.

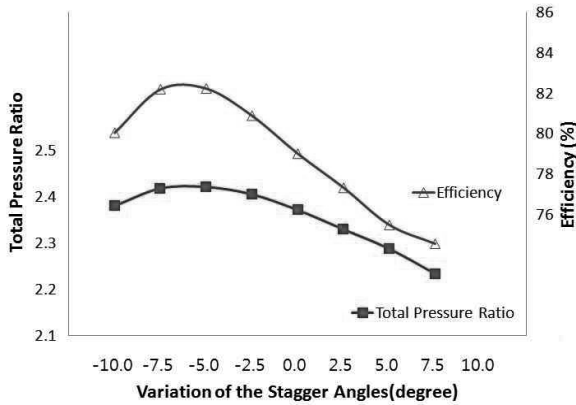


Fig. 8 Performance Curves with the Variation of the Stagger Angles $\dot{m}=0.25\text{kg/s}$

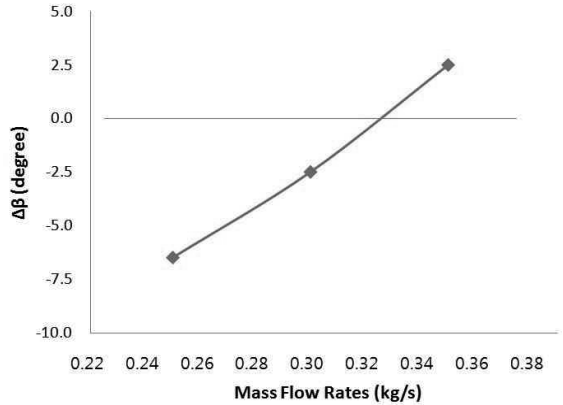


Fig. 10 Optimal Stagger Angles for the Different Flow Rates

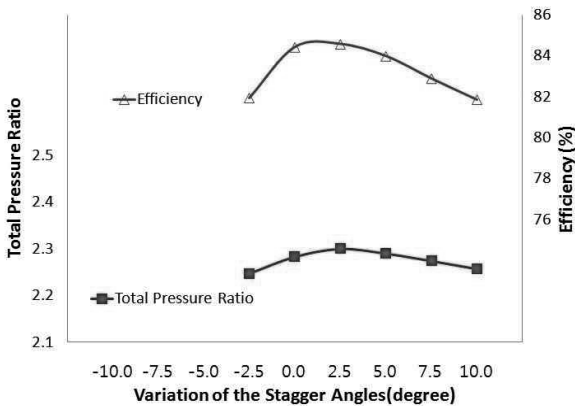


Fig. 9 Performance Curves with the Variation of the Stagger Angles $\dot{m}=0.35\text{kg/s}$

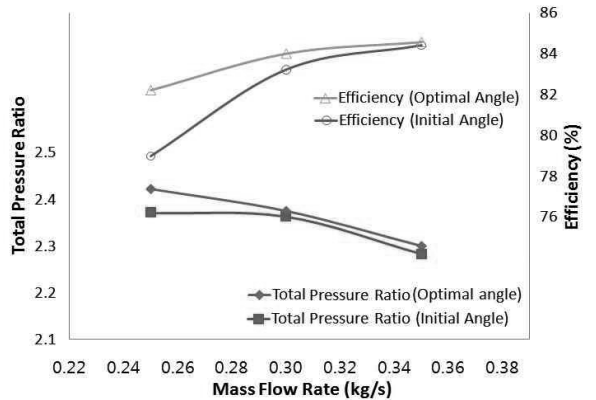


Fig. 11 Comparison of Performances

저유량($\dot{m}=0.25\text{kg/s}$; 83%)에서의 압축기의 공력성능 해석 결과는 Fig. 8과 같다. 압력비와 효율 모두 깃배치각이 -6.5° 에서 최고값을 보인다. 이 결과는 실제 운전시 깃배치각을 -6.5° 로 조정하면 최고 성능을 얻을 수 있음을 의미한다. 만일, 설계배치각을 17.3° 로 재설계했다면 조정각은 -4° 이며, 이는 Fig. 6의 저유량시 입구 유동각 변화폭인 $+4.3^\circ$ 과 관련이 있다.

고유량($\dot{m}=0.35\text{kg/s}$; 117%)에서의 압축기의 공력성능 해석 결과는 Fig. 9와 같다. 압력비와 효율 모두 깃배치각이 $+2.5^\circ$ 에서 최고값을 보인다. 이 결과는 실제 운전시 깃배치각을 $+2.5^\circ$ 로 조정하면 최고 성능을 얻을 수 있음을 의미한다. 만일, 설계배치각을 17.3° 로 재설계했다면 조정각은 $+5^\circ$ 이며, 이는 Fig. 6의 고유량시 입구 유동각 변화폭인 -4.7° 과 관련이 있다.

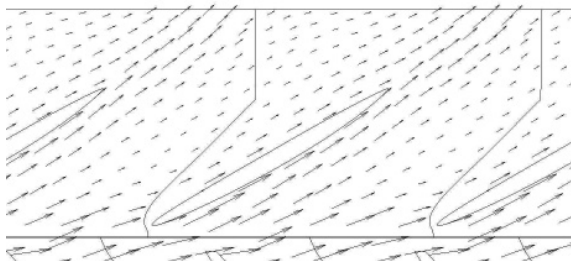
3.3 최적 깃배치각의 도출

3.2절의 결과를 바탕으로 유량별 최적 깃배치각을 도출하면 Fig. 10과 같다. 공력성능을 3.1절의 기설계 깃배치각과 Fig. 10의 각 유량별 최적 깃배치각과 비교하면 Fig. 11과 같다.

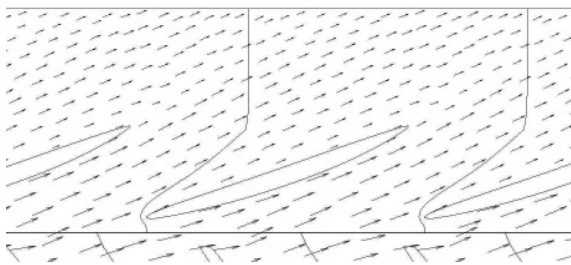
Fig. 12(저유량)과 Fig. 13(고유량)는 평균면에서 압축기 내부의 유동장을 깃배치각 관점에서 비교한 것이다.

저유량의 경우(Fig.12), 기설계 배치각은 입구 유동각에 비해 크므로 깃 가압면의 유동 특성이 좋지 못하다. 고유량의 경우(Fig.13), 기설계 배치각은 입구 유동각에 비해 작으므로 깃 부압면 입구에서 유동박리가 생긴다. 고유량의 경우, 실속(stall) 가능성이 있어 운전상 주의가 요구되는 범위이므로 깃배치각의 조절이 중요하다.

위의 방법을 바탕으로 유량이나 회전수 등 시뮬레이션 경우를 더 늘리면 디퓨저 깃배치각에 대한 더 정확한 정보를 구할 수 있다.

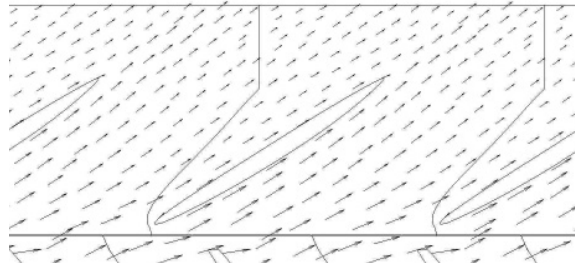


(a) Worst Angle ($\Delta\beta_D = +7.5^\circ$)

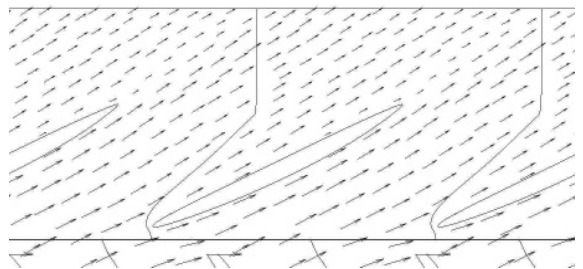


(b) Optimal Angle ($\Delta\beta_D = -7.5^\circ$)

Fig. 12 Velocity vectors inside the diffuser at $\dot{m}=0.25g/s$



(a) Worst Angle ($\Delta\beta_D = +10^\circ$)



(b) Optimal Angle ($\Delta\beta_D = +2.5^\circ$)

Fig. 13 Velocity vectors inside the diffuser at $\dot{m}=0.35g/s$

4. 결론

이번 연구에서는 베인이 설치된 원심압축기에서 디퓨저부의 깃 배치각 변화에 따른 압축기의 공력 특성을 상용프로그램인 CFX를 사용하여 수치적으로 해석하여 성능 특성을 분석하였다.

설계에서 결정된 베인 깃각을 기준으로 하여 $\pm 10^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 유량 변화에 대한 적절한 배치각을 제시하였다.

본 연구의 시도는 기존 설계 절차에 CFD기법을 이용함으로써 설계에 필요한 정보를 제공하는 의미로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 2004, Giovanni, F. et. al., "Low Solidity Vaned Diffuser for

Rotating Stall Prevention: Experimental Analysis of Some Design Parameters," *ASME Paper GT2004-54146*.

[2] 2007, Oh, J. and Agrawal, G., "Numerical Investigation of Low Solidity Vaned Diffuser Performance in a High-Pressure Centrifugal Compressor, Part I: Influence of Vane Solidity," *ASME Paper GT2007-27260*.
 [3] 2008, Oh, J., Buckley, C. and Agrawal, G., "Numerical Investigation of Low Solidity Vaned Diffuser Performance in a High-Pressure Centrifugal Compressor, Part II: Influence of Vane Stagger," *ASME Paper GT2008-50178*.
 [4] 2008, 김세미, "반응면기법을 이용한 원심압축기 최적설계," 석사학위논문, 포항공과대학교
 [5] 2007, Boncinelli, P. and Arnone, A., "On Effects of Impeller-Diffuser Interaction in the RADIVER Centrifugal Compressor," *ASME Paper GT2007-27384*.
 [6] 2009, ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. Version 12.1, ANSYS, Inc.