

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], 디퓨저의 폭 변화가 성능에 미치는 영향에 대한 전산해석[2], 고압용 원심압축기에서 디퓨저의 깃수와 깃각이 성능 특성에 미치는 수치해석적 연구[3,4], 반응면기법을 이용하여 임펠러의 형상 개선과 디퓨저 깃수 변화에 따른 압축기의 최적화 과정에 수치기법을 적용한 연구[5] 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

접수일: 2010년 7월 9일, 수정일: 2010년 9월 13일,

게재확정일: 2010년 9월 17일.

1 정희원, 경상대학교 대학원 기계공학과

2 종신회원, 경상대학교 기계공학과, 항공기부품기술연구소

3 정희원, 한국기계연구원

4 정희원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

5 종신회원, 포항공과대학교 기계공학과

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

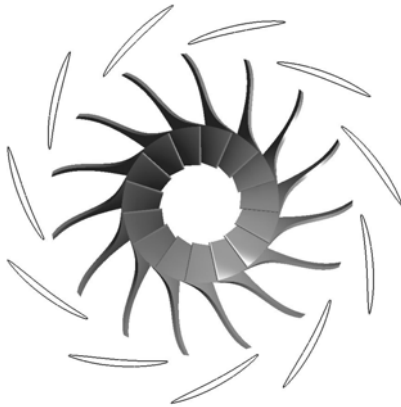


Fig. 1 Full 2-D view of the impeller and vane geometry

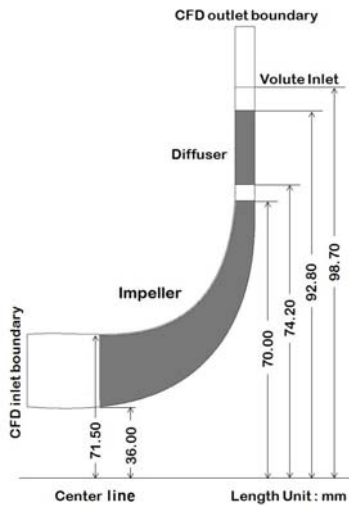
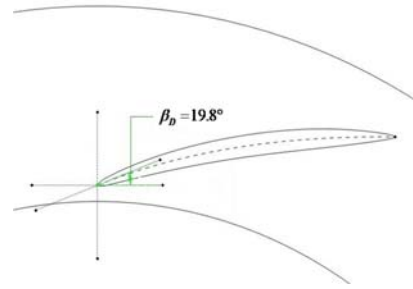


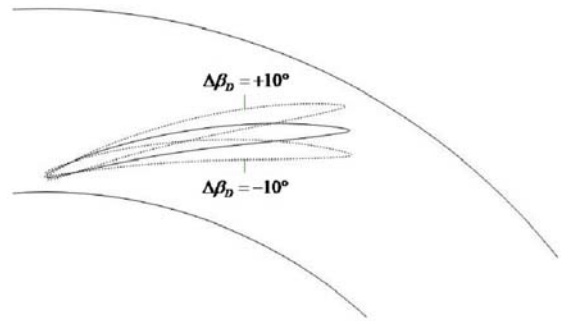
Fig. 2 Flow path in the meridional view

본 연구에서 적용한 모델은 250 kw급 고온 발전용 연료전지 시스템의 공기압축용 원심압축기이다. 설계조건은 유량이 0.30 kg/s, 압력비는 2.34이며 임펠러의 회전수는 50,000 rpm이다. 임펠러와 디퓨저 베인의 기본형상은 Fig. 1과 같고 자오면상의 유로 형상은 Fig. 2와 같다. 보다 상세한 내용은 참고문헌[5]에 기술되어 있다.

운전 중에 조절이 가능한 디퓨저의 경우 베인 날개의 무게 중심에서 각을 조절한 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° 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 분석하였다.



(a) Initial design point



(b) Sketch of different stagger angles

Fig. 3 Definition sketch of diffuser vane with different stagger angles

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[6]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[7]을 사용하였다. BladeGen과 Turbo-Grid를 이용하여 계산격자점을 생성하였다. Hexa형의 정규격자계를 채택하여, Fig. 4와 같이 임펠러에는 28만 개, 디퓨저에는 14만개의 계산격자점이 소요되었다.

유동장 입구에는 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.

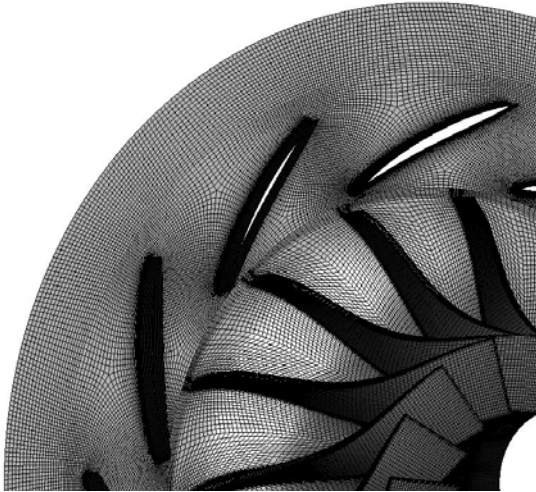


Fig. 4 Computational meshes

3. 해석 결과 및 검토

3.1 기 설계 깃배치각에서의 공력 성능

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

유량 변화에 따른 디퓨저 입구에서의 유동 조건을 속도삼각형으로 도시하면 Fig. 6과 같다. 본 연구에서와 같이 회전수가 일정하면 유량이 감소할수록 디퓨저 입구의 유동각이 작아짐을 확인할 수 있다. 설계유량을 기준으로 저유량($\dot{m}=0.25$ kg/s; 83%)의 경우 -4.7°, 고유량($\dot{m}=0.35$ kg/s; 117%)의 경우 +4.3° 정도 유입각이 변한다. 따라서 디퓨저 입구부분에서 유동이 원활하도록 깃배치각을 조절할 필요가 있다.

유량과 회전수의 비율을 일정하게 유지하면 속도의 상사성이 보존된다. 따라서 회전수를 조절하면 유량변화에 무관하게 유입각을 일정하게 유지할 수도 있다.

3.2 깃배치각 변화에 따른 공력 성능 변화

깃배치각을 설계배치각 기준으로 $\pm 10^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 설계유량, 저유량, 고유량 등 3가지 유량 조건에서 해석하였다.

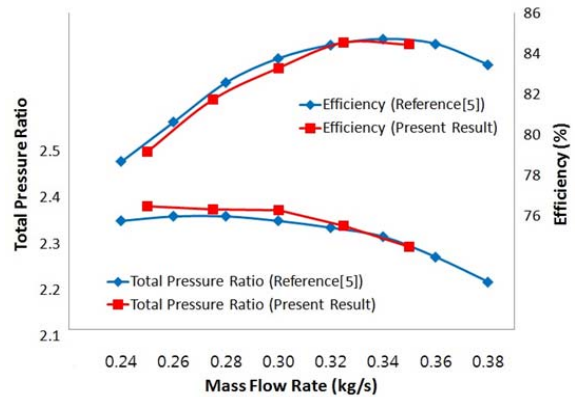


Fig. 5 Performance curves with the initial-design stagger angle

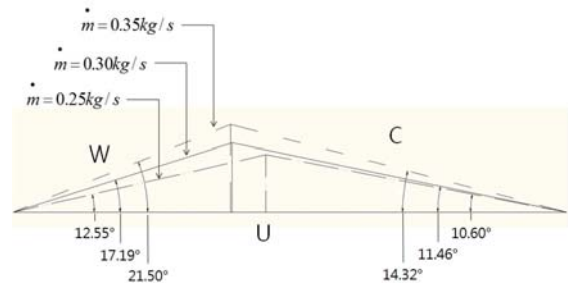


Fig. 6 Velocity triangle at the diffuser inlet

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

저유량($\dot{m}=0.25$ kg/s; 83%)에서의 압축기의 공력 성능 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 -4.7° 과 관련이 있다.

고유량($\dot{m}=0.35$ kg/s; 117%)에서의 압축기의 공력 성능 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 $+4.3^\circ$ 과 관련이 있다.

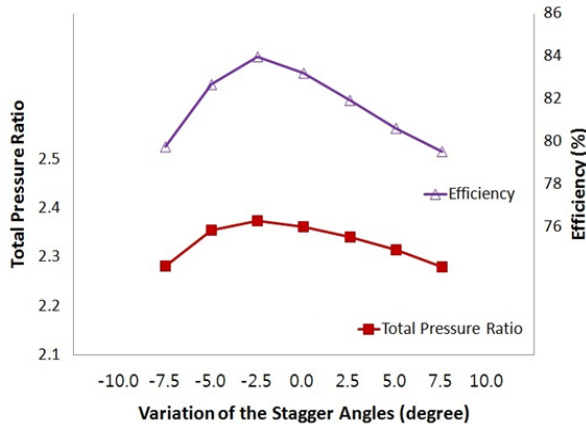


Fig. 7 Performance curves with the variation of the stagger angles at $\dot{m}=0.30$ kg/s

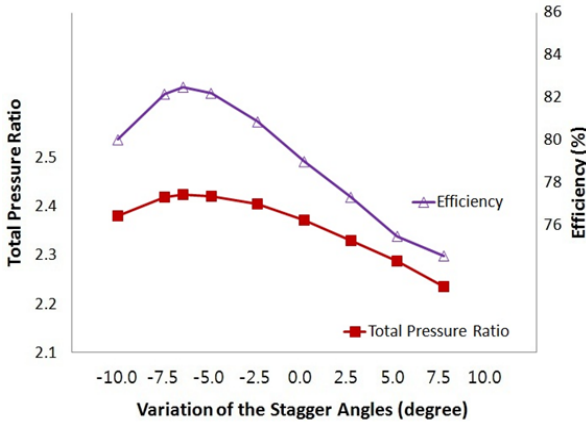


Fig. 8 Performance curves with the variation of the stagger angles at $\dot{m}=0.25$ kg/s

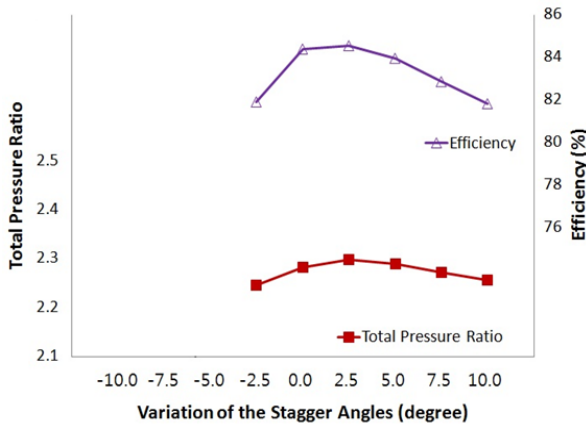


Fig. 9 Performance curves with the variation of the stagger angles at $\dot{m}=0.35$ kg/s

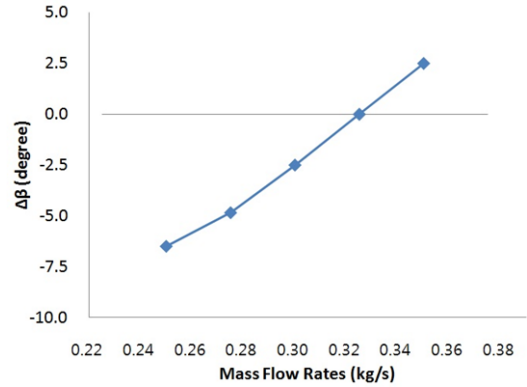


Fig. 10 Optimal stagger angles for the different flow rates

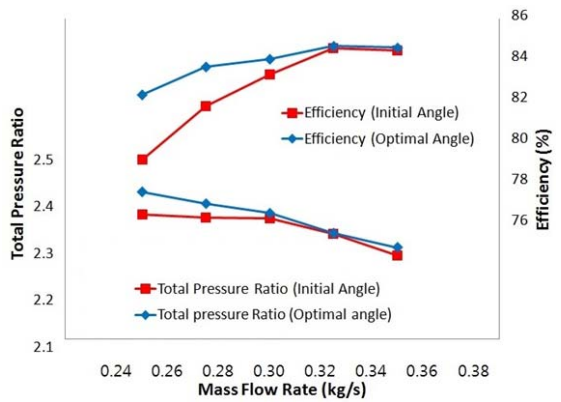


Fig. 11 Comparison of performances

3.3 최적 깃배치각의 도출

3.2절의 결과를 바탕으로 유량 변화에 대한 최적 깃배치각을 도출하면 Fig. 10과 같다. Fig. 3에 정의된 기설계 깃배치각을 기준으로, 작동유량이 감소할수록 디퓨저의 깃배치각을 시계 방향으로 회전하여 디퓨저의 입구 유효단면적을 감소시켜야 한다. Fig. 10의 결과는 유량 변동에 따른 최적 운전조건을 얻기 위한 디퓨저 깃배치각의 변동 정도를 정량적으로 제시해 준다.

압력비, 효율 등 두가지 주요 공력성능 관점에서 기설계 깃배치각과 Fig. 10의 각 유량별 최적 깃배치각을 비교하면 Fig. 11과 같다. 개선된 성능을 백분위 비율로 표시하면 Table 1과 같다. 저유량 일수록 공력성능이 크게 개선되었다.

Table 1 Improvement of performances in percentage

Mass flow rate	Pressure (%)	Efficiency (%)
lower flow, $\dot{m}=0.25$ kg/s	2.23	4.45
design flow, $\dot{m}=0.30$ kg/s	0.47	0.93
higher flow, $\dot{m}=0.35$ kg/s	0.74	0.18

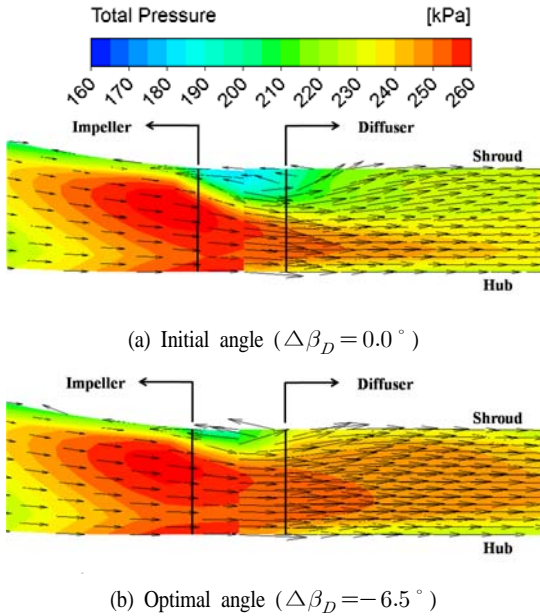


Fig. 12 Distribution of total pressure and velocity vector along the flow path at $\dot{m}=0.25$ kg/s

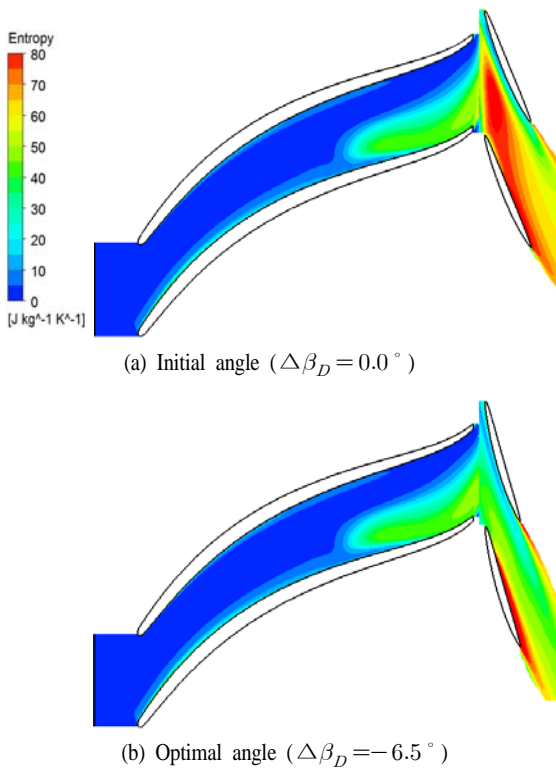


Fig. 13 Distribution of entropy inside mid-span of the compressor at $\dot{m}=0.25$ kg/s

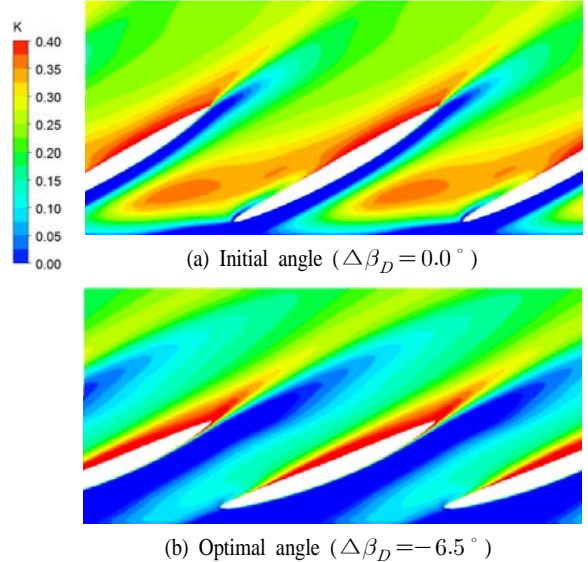


Fig. 14 Distribution of total pressure loss coefficients inside mid-span of the diffuser at $\dot{m}=0.25$ kg/s

Fig. 12는 저유량인 경우 유로에 따라 압력과 속도의 변화를 도시한 것이다. 임펠러 출구와 디퓨저 입구 사이인 인접면에서는 상호작용이 발생한다. 특히 쉬라우드 부근은 팁에 의한 누설도 발생하므로 유동이 불안정하여 역류가 발생되었다. 최적 깃각에서는 기설계 깃각에 비해 역류의 크기가 훨씬 감소됨을 알 수 있다. 깃각의 조절로 유로를 따라 손실이 개선되었음을 Fig. 13의 엔트로피 분포에서도 발견할 수 있다. 기설계 깃각의 경우 디퓨저 입구와 부압면 부근에서 엔트로피의 증가가 큼을 알 수 있다.

디퓨저의 주요 성능변수 중 하나인 전압력손실계수(total pressure loss coefficient), K 는 디퓨저 입구에서의 동압에 대한 전압력의 손실 비율을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{P_{t,in} - P_{t,local}}{P_{t,in} - P_{s,in}} \quad (1)$$

여기서, $P_{t,in}$, $P_{s,in}$ 은 디퓨저 입구에서의 전압 및 정압이며, $P_{t,local}$ 은 디퓨저 내부의 임의의 지점에서의 전압을 의미한다.

깃배치각의 영향이 큰 저유량에 대해서, 평균면에서의 전압 손실의 변화를 기설계 깃각과 최적 깃각의 경우를 비교하면 Fig. 14와 같다. 기설계 깃각은 입구 유동각에 비해 크므로 부압면 선단 부근의 유동질이 나빠져서 유동이 진행됨에 따라 손실이 커짐을 알 수 있다. 디퓨저의 깃각을 입구 유동을 고려하여 적절히 재배치하면 압력손실이 줄어들음을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of pressure losses in diffusers

Mass flow rate	Conditions	K
$\dot{m}=0.25$ kg/s	Initial angle	0.251
	Optimal angle	0.237
$\dot{m}=0.30$ kg/s	Initial angle	0.201
	Optimal angle	0.198
$\dot{m}=0.35$ kg/s	Initial angle	0.181
	Optimal angle	0.169

디퓨저 출구를 기준으로 하여 작동 유량변화에 따른 디퓨저의 압력손실계수를 정리하면 Table 2와 같은 결과를 얻었다. Table 1와 같이 저유량에서 디퓨저의 성능이 더 많이 개선되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 베인이 설치된 원심압축기에서 디퓨저의 깃배치각 변화에 따른 압축기의 공력 특성을 상용프로그램인 CFX를 사용하여 수치적으로 해석하여 성능 특성을 분석하였다.

설계에서 결정된 베인 깃각을 기준으로 하여 $\pm 10^\circ$ 범위에 서 깃배치각을 변경하여 유량 변화에 대한 최적의 성능을 나타내는 깃배치각을 제시하였고, 주요 공력 성능이 향상됨을 확인하였다.

본 연구의 시도는 기존 설계 절차에 CFD기법을 이용함으로써 압축성 터보기계의 운전 및 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] 2010, 이상철, 이원석, 신유환, 정진택, "전산해석을 통한 원심압축기용 디퓨저의 폭변화에 대한 연구," *한국전산유체공학회 춘계학술대회논문집*, pp.136-141.
- [3] 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*.
- [4] 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*.
- [5] 2007, 김세미, 박준영, 안국영, 백제현, "반응면기법을 이용한 원심압축기 최적설계," *한국전산유체공학회 추계학술대회논문집*, pp.92-99.
- [6] 2007, Boncinelli, P. and Arnone, A., "On Effects of Impeller-Diffuser Interaction in the RADIVER Centrifugal Compressor," *ASME Paper GT2007-27384*.
- [7] 2009, ANSYS *CFX-Solver Modeling Guide. Version 12.1*, ANSYS, Inc.