

고마력 터보 블로어의 최적 깃배치각에 관한 수치 예측

박태규,¹ 정희택,^{*2} 박준영,³ 성병일⁴

NUMERICAL PREDICTION OF THE OPTIMAL STAGGER ANGLES FOR A HIGH-POWER TURBO BLOWER

T.G. Park,¹ H.T. Chung,^{*2} J.Y. Park³ and B.I. Sung⁴

The turbo blowers having large power capacity are generally composed of the variable inlet guide vane, the impeller and the variable diffuser. In the present study, the effect of the stagger angles on the aerodynamic performances has been investigated by CFD methods. The design specifications of the reference model having 400kW power were given as 7.43kg/s of mass flow rate, 1.66 of pressure ratio with 12000rpm of impeller rotating speed. As the first simulation parameter, the diffuser vane angle was varied in the range of ± 20 degree from the initial-design point. The inlet guide vane angles, as the second one, was changed in the range of ± 40 degree from the initial-design point. The commercial Navier-Stokes solver, ANSYS-CFX, was applied to solve the three-dimensional unsteady flow fields inside the turbo blower. 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), 터보 블로어(Turbo Blower), 입구안내익(Inlet Guide Vane), 디퓨저(Diffuser)

1. 서 론

산업설비에서 고압축용 공기 이송 수단으로 사용되는 터보 블로어는 입구 안내익, 임펠러와 디퓨저로 구성된다. 입구안내익은 임펠러 상부에 설치되어 흡입 유량을 조절하거나 임펠러 입구의 상대속도를 줄여 충격과 발생을 지연시키는 역할을 한다. 임펠러 출구의 디퓨저에는 가변 깃을 설치하여 압력 회복성의 효율을 증가시킨다.

입구 안내익과 공력 성능에 대한 영향에 대한 연구로는, 원심압축기의 입구 예선회에 의한 성능변화에 대한 실험적 연구[1], 축류압축기에서의 입구안내익 유무에 의한 성능변화

에 대한 전산시뮬레이션 연구[2] 등이 있다. 디퓨저의 주요 인자와 공력 해석과 관련된 연구로는 디퓨저의 폭 변화가 성능에 미치는 영향에 대한 전산해석[3], 고압용 원심압축기에서 디퓨저의 깃수와 깃각이 성능 특성에 미치는 수치해석적 연구[4,5], 디퓨저 깃수 변화에 따른 압축기의 최적화 과정에 수치기법을 적용한 연구[6] 등이 있다. 입구 안내익과 디퓨저에 가변익을 설치하여 동시 제어하면 효율성이 높은 작동 영역을 확보할 수 있다. 이에 대해서는 서지 방생 억제에 대한 실험적 연구[7], 최적 조합비의 도출 제시[8] 등이 있다.

공력설계 단계에서는 설계점에서의 최적 효율을 위한 안내익과 디퓨저의 깃각을 결정하여 제품 제작 단계로 진행한다. 유량 변동 등 운전 조건에 따른 적절한 깃각은 성능시험 단계에서 구하는 것이 통상적이다. 이러한 기존 설계 절차에 CFD기법을 이용하면 시행착오를 줄이고 설계의 효율성을 증진할 수 있다. 본 연구에서는 기존에 개발된 원심형 블로어에 대해 입구안내익과 디퓨저 베인의 깃배치각 변화에 따른 공력성능 특성을 수치적으로 해석하고, 동시제어에 의한 최적의 배치각을 예측하는 시도를 하고자 한다.

접수일: 2011년 06월 29일, 수정일: 2011년 09월 15일.

게재확정일: 2011년 09월 16일

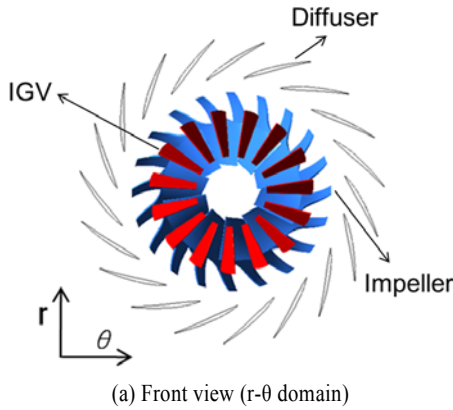
1 정희원, 경상대학교 대학원 기계공학과

2 종신회원, 경상대학교 기계공학과, 항공기부품기술연구소

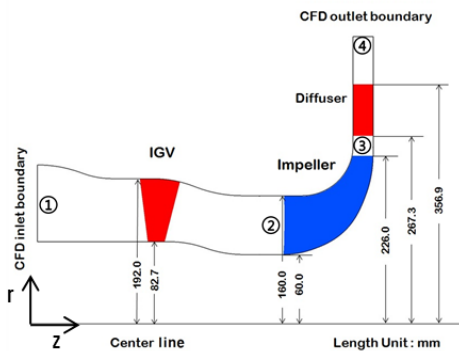
3 한국기계연구원

4 삼성터빈(주)

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



(a) Front view (r-θ domain)



(b) Flow path (r-z domain)

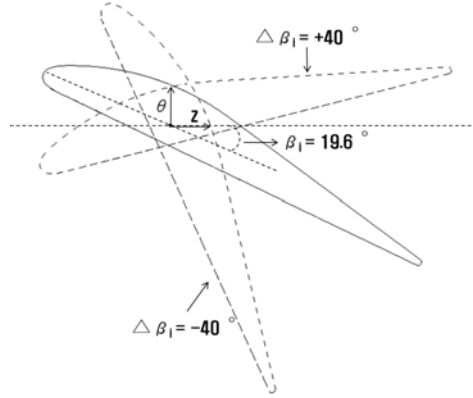
Fig. 1 Sectional view

2. 적용 모델 및 해석기법

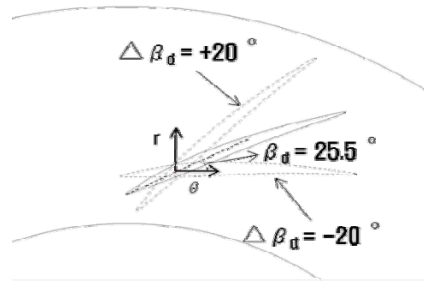
2.1 적용 모델

본 연구에서 사용된 터보 블로어는 입력과위가 400kW로서 하수처리장에서 폭기용으로 사용되고 있다. Fig. 1과 같은 형상으로 입구가이드 베인(IGV), 임펠러 그리고 디퓨저로 구성된다[9]. 설계조건에서의 유량은 7.43kg/s이고 임펠러는 12,000 rpm으로 회전되며 터보 블로어의 입출구에서의 요구 전압력비는 1.66이다. 보다 상세한 내용은 참고문헌[9]에 기술되어 있다.

본 연구의 해석변수는 입구 안내익 및 디퓨저에 설치된 가변익의 각도이다. 적용된 가변익의 형상과 조정범위 등은 Fig. 2와 같다. 설계에서 결정된 입구 안내익의 깃배치각(stagger angle)은 19.6°이고, 이를 기준으로 하여 ±40° 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 분석하였다. 디퓨저의 깃배치각(stagger angle)은 25.5°이고, 이를 기준으로 하여 ±20° 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 분석하였다.



(a) Inlet guide vane (IGV)



(b) Diffuser

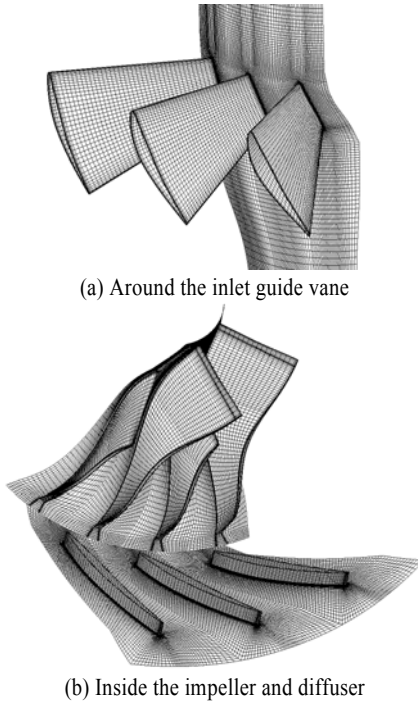
Fig. 2 Definition sketch of stagger angles

2.2 해석기법

본 연구의 해석 영역은 Fig. 1과 같이 안내익 입구에서 디퓨저 출구로 설정되었다. 입구안내익과 디퓨저는 고정되어 있고 임펠러는 회전한다. 입구안내익과 임펠러 입구 및 임펠러 출구와 디퓨저 입구 사이의 인접면에는 원주방향의 평균값을 이용하는 혼합면기법(mixing-plane method)을 이용하였다. 난류 모델로는 터보기계 유동장에 주로 사용되는 k-ω SST(shear stress transport)모델을 적용하였다. 유동해석을 위해서 열-유동 범용해석 프로그램인 ANSYS사의 CFX solver와 turbo 모듈[10]을 사용하였다.

BladeGen과 Turbo-Grid를 이용하여 계산격자점을 생성하였다. Hexa형태의 정규격자계를 채택하였다. Fig. 3은 각 파트의 표면에서의 격자를 나타내고 있으며, 입구안내익에는 20만개, 임펠러에는 26만개 그리고 디퓨저에는 15만개의 계산격자점이 소요되었다.

입구 안내익의 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.



(a) Around the inlet guide vane

(b) Inside the impeller and diffuser

Fig. 3 Computational meshes

3. 해석 결과 및 검토

Fig. 3에 정의된 바와 같이 입구안내익과 디퓨저의 설계 깃배치각을 기준으로 깃배치각의 가변에 따른 터보 블로어의 공력 성능을 분석하고자 한다. 입구안내익의 입구(Fig. 1의 ①점)와 디퓨저 출구(Fig. 1의 ④점)를 기준으로 아래 식(1)과 식(2)로 정의되는 전압비, PR과 등엔트로피 효율, η_{tt} 을 주요 성능인자로 선정하였다.

$$PR = \frac{P_{04}}{P_{01}} \tag{1}$$

$$\eta_{tt} = \frac{\left(\frac{P_{04}}{P_{01}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left(\frac{T_{04}}{T_{01}}\right) - 1} \tag{2}$$

적용 모델의 요구 운전범위는, 회전수는 고정되었으며 유량 변동은 최저 50%에서 최고 120%이다[9]. 이를 기준으로 본연구의 해석변수는 설계기준 유량인 7.43 kg/s를 100%로 하여 저유량($\dot{m}=3.72$ kg/s; 50%), 고유량($\dot{m}=9.03$ kg/s; 120%) 등 3가지 흡입유량을 운전조건으로 설정하였다.

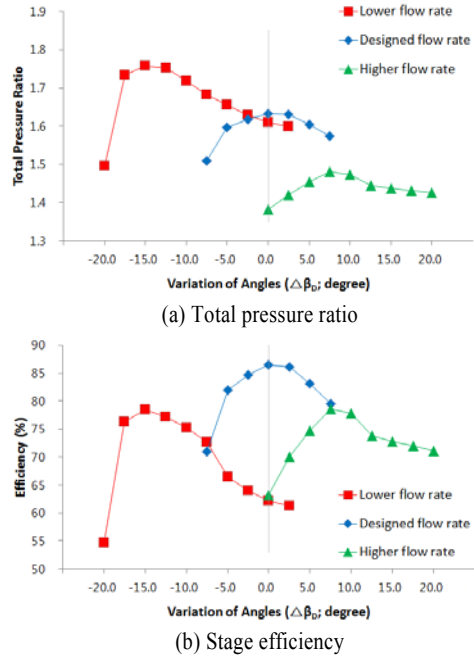


Fig. 4 Performance curves with the variation of the diffuser stagger angles

3.1 디퓨저 깃배치각 변화에 따른 공력성능 특성

입구안내익은 설계 깃배치각인 19.6°에 고정시키고 디퓨저 깃배치각을 설계배치각 기준으로 $\pm 20^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 설계유량, 저유량, 고유량 등 3가지 유량 조건에서 해석하였다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 전압비와 효율 모두 유사한 경향을 나타낸다. 공력성능은 저유량의 경우 -15°, 설계점은 0°, 고유량의 경우 +7.5°에서 최고치를 보인다. 이는 작동유량이 증가할수록 깃배치각을 시계 반대방향으로 회전하여 디퓨저의 입구 유효단면적을 증가시켜야 한다는 기존의 논문[5] 결과와 일치한다.

설계유량에서는 깃배치각 변동이 없는 경우 즉, $\Delta\beta_d=0^\circ$ 에서 최고의 성능을 보이므로 디퓨저의 설계 깃배치각인 $\beta_d=25.5^\circ$ 는 적절하다.

3.2 입구안내익 깃배치각 변화에 따른 공력성능 특성

디퓨저 배인은 설계 깃배치각인 25.5°에 고정시키고 입구 안내익의 깃배치각을 설계배치각 기준으로 $\pm 40^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 공력특성을 설계유량, 저유량, 고유량 등 3가지 유량 조건에서 해석하였다.

Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 깃배치각 변동, $\Delta\beta_i$ 이 +방향으로 클수록 전압비는 증가한다. 이는 Fig. 2(a)에 도시한 바와 같

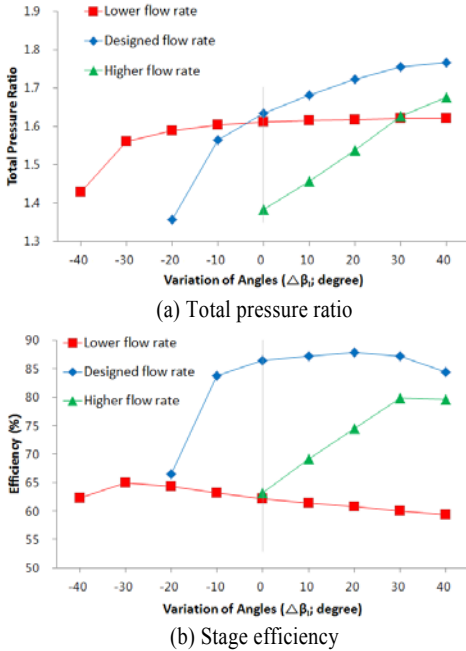


Fig. 5 Performance curves with the variation of the IGV stagger angles

이 각각을 시계반대방향으로 회전할수록 입구안내익의 유효 단면적이 증가하여 유동손실이 상대적으로 적고 예선회 (prewhirl)이 음(-)의 값을 가지므로 임펠러의 압축일이 증가하기 때문이다. 이는 유량이 클수록 변화율이 크게 된다.

효율은 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 유량별로 최고치를 확인할 수 있다. 이를 고려하여 본 연구에서는 입구안내익의 경우 효율을 공력성능의 기준으로 두었다. 저유량의 경우 -30°, 설계점은 +20°, 고유량의 경우 +30°에서 최고치를 보인다. 설계유량에서는 깃배치각 변동, Δβ_i=+20°에서 최고의 성능을 보이는데 Fig. 2(a)의 기하학적 형상을 고려하면 입구안내익의 설계 깃배치각은 β_i=0° 즉, 축방향으로 설치하여야 함을 의미한다.

3.3 최적 깃배치각의 도출

3.1절과 3.2절의 결과를 바탕으로 유량 변화에 대한 최적

Table 1 Optimal stagger angles according to operation conditions

Flow rate	3.72 kg/s (50%)	7.43 kg/s (100%)	9.03 kg/s (120%)
Diffuser	-15°	0°	+7.5°
IGV	-30°	+20°	+30°

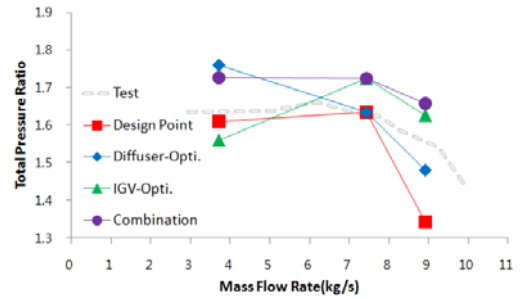


Fig. 6 Comparisons of total pressure ratio

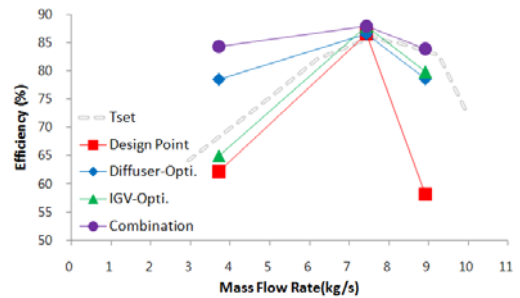


Fig. 7 Comparisons of stage efficiency

깃배치각을 정리하면 Table 1과 같다. 초기설계 깃설치각인 경우(design point), 디퓨저만 최적 설치각인 경우(diffuser optimal), 입구안내익만 최적 설치각인 경우(IGV optimal), 둘 다 고려한 경우(Combination) 등 4가지 조건으로 공력 해석한 결과는 Fig. 6의 전압비, Fig. 7의 효율 관점으로 도시하였다. 해당그림에서 기존의 성능시험 데이터는 입구안내익만 유량별로 조절하여 실험하였다[9]. 본 수치해석의 IGV optimal 경우와 유사하다. 입구안내익과 디퓨저를 동시에 제어하는 방법이 둘 중 하나만을 사용하여 제어하는 것보다 공력성능이 좋다는 기존의 논문[8] 결과를 입증해 준다.

임펠러의 공력성능은 식(3)의 압축일, W 로, 디퓨저는 식(4)의 압력회복계수, C_p 로 각각 나타낼 수 있다.

$$W = U_3 V_{\theta 3} - U_2 V_{\theta 2} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_4 - P_3}{P_{03} - P_3} \quad (4)$$

이에 대한 결과를 정리하면 Table 2의 임펠러 압축일, Table 3의 디퓨저 회복계수와 같다. 디퓨저 깃각이 안내익 깃각보다 영향이 큼을 알 수 있다. 터보 블로어 전체의 공력성능 결과와 마찬가지로 임펠러, 디퓨저 각각에 대해서도 최적의 조건을 조합하여 동시에 제어한 쪽이 가장 우수한 성능을

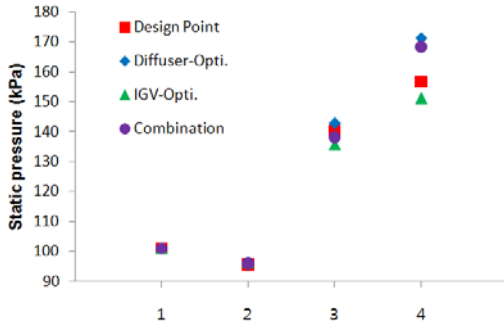


Fig. 8 Variation of static pressure along the flow path at 50% of mass flow rate

보인다.

3.4 저유량 조건에서의 유동특성 분석

3.3절의 결과에서 저유량 영역(50%)에서 깃배치각의 변화에 의한 공력성능의 영향이 가장 크게 나타났다. 이 유동 영역에서, 공력성능 상승의 원인을 분석해보았다.

각각의 조건에서 유로에 따른 정압(static pressure)의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. x축은 Fig. 1(b)에서 설정된 터보 블로어의 성능 측정지점이다. ③과 ④ 사이인 디퓨저 내부에서 정압차이가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 최종 정압은 디퓨저 깃각의 영향이 가장 크고 입구안내이의 조절은 정압 상승에 그리 효율적이지 못한 결과를 보인다. 실제 터보블로어에서는 디퓨저 후부에 스크롤형 볼류타가 존재하므로 디퓨저 출구에서의 정압 뿐만 아니라 속도장 특성 등도 중요하다. 따

Table 2 Comparisons of compression work in impeller

Flow rate / Angle condition	3.72 kg/s (50%)	7.43 kg/s (100%)	9.03 kg/s (120%)
Design point	22.90	48.24	42.63
Diffuser optimal	53.32	48.24	42.37
IGV optimal	26.00	51.23	52.88
Combination	55.17	51.23	48.84

Table 3 Comparisons of pressure recovery coefficient in diffuser

Flow rate / Angle condition	3.72 kg/s (50%)	7.43 kg/s (100%)	9.03 kg/s (120%)
Design point	0.38	0.66	0.11
Diffuser optimal	0.67	0.66	0.49
IGV optimal	0.36	0.68	0.15
Combination	0.71	0.68	0.53

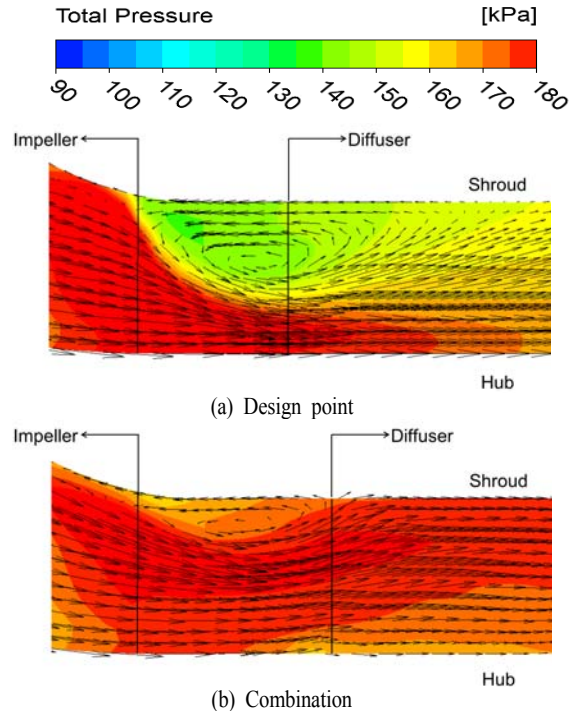


Fig. 9 Distribution of total pressure and velocity vector along the flow path at 50% of mass flow rate

라서 최종 공력성능을 디퓨저 출구 정압으로만 판단하기는 무리이다. 전체 공력성능은 식(1)과 식(2)의 기준에 따른 Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 따르는 것이 합리적이라 사료된다.

Fig. 9는 주유로 방향으로 전압력과 속도의 변화를 초기 설계각 조건과 동시제어 조건을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 9(b)의 최적의 깃배치각이 조합된 경우에 디퓨저에서 전압력이 높게 나타난다. 임펠러 출구와 디퓨저 입구 사이인 인접면에서는 상호작용이 발생하는데, 특히 쉬라우드 부근은 팁에 의한 누설도 발생하므로 유동이 불안정하여 역류가 발생되었다. 최적의 깃배치각이 조합된 경우에서는 기설계 깃배치각에 비해 역류의 크기가 훨씬 감소됨을 알 수 있다. 또한, 깃배치각의 조절로 유로를 따라 손실이 개선되었음을 Fig. 10의 엔트로피 분포에서도 발견할 수 있다. 기설계 깃배치각의 경우 디퓨저 입구와 부압면 부근에서 엔트로피의 증가가 큼을 알 수 있다.

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

$$K = \frac{P_{03} - P_{0,local}}{P_{03} - P_3} \quad (5)$$

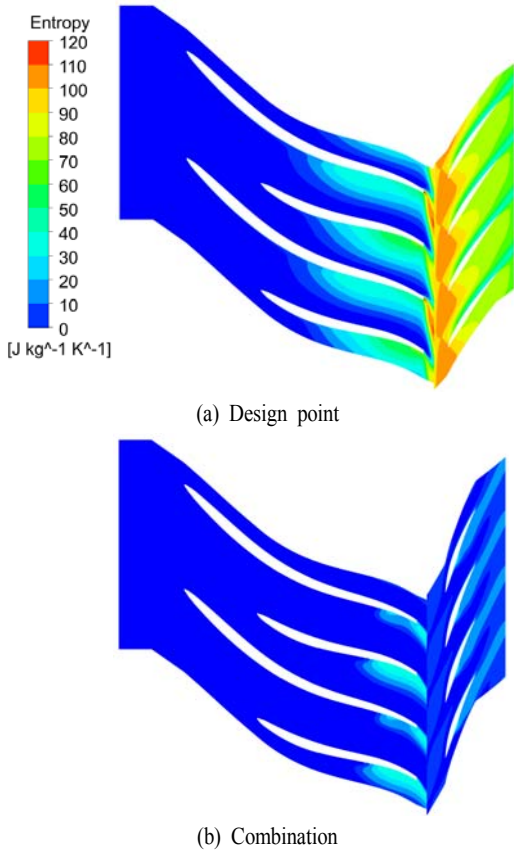


Fig. 10 Distribution of entropy inside mid-span at 50% of mass flow rate

여기서, P_{03} , P_3 은 각각 디퓨저 입구에서의 전압 및 정압이며, $P_{0,local}$ 은 디퓨저 내부의 임의의 지점에서의 전압을 의미한다.

평균면에서의 전압 손실의 변화를 기설계 깃배치각과 최적 깃배치각이 조합된 경우를 비교하면 Fig. 11와 같다. 기설계 깃배치각은 입구 유동각과 차이가 있어 부압면 선단 부근의 유동질이 나빠져서 유동이 진행됨에 따라 손실이 커짐을 알 수 있다. 디퓨저의 깃배치각을 입구 유동을 고려하여 적절히 재배치하면 손실이 줄어 성능은 개선됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 베인이 설치된 터보 블로어에서 입구안내익과 디퓨저의 깃배치각 변화에 따른 공력 특성을 전산모사를 통하여 분석하였다.

설계에서 결정된 깃배치각을 기준으로 하여 입구안내익의

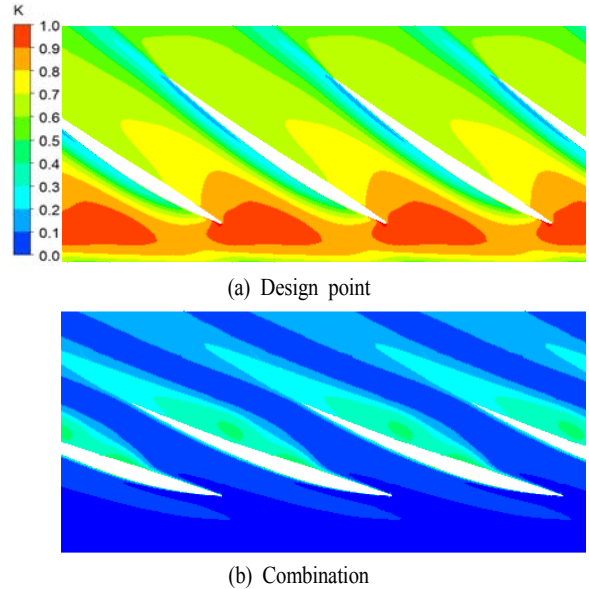


Fig. 11 Distribution of total pressure loss coefficients inside mid-span of the diffuser at 50% of mass flow rate

경우 $\pm 40^\circ$ 범위에서, 디퓨저의 경우 $\pm 20^\circ$ 범위에서 깃배치각을 변경하여 유량 변화에 대해 입구안내익과 디퓨저가 적절히 조합된 깃배치각을 제시하였고, 압력비와 효율 등 주요 공력 성능이 향상됨을 확인하였다.

본 연구의 결과는 고압축성 터보 블로어의 시운전 및 설계 개선에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]과 경상대학교 교수연구년제 연구지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 2002, 차봉준, 박종호, “입구 안내익 영향으로 인한 원심 압축기 성능특성 시험연구,” *유체기계저널*, 제5권, 제3호, pp.46-53.
- [2] 2009, 고성호, 광영근, 한승열, 김연태, “IGV의 유무에 따른 압축기의 성능변화,” *유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp.631-636.
- [3] 2010, 이상철, 이원석, 신유환, 정진택, “전산해석을 통한 원심압축기용 디퓨저의 폭변화에 대한 연구,” *한국전산유*

- 체공학회 추계학술대회논문집, pp.136-141.
- [4] 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.
- [5] 2010, 박태규 외5인, "디퓨저 깃배치각의 변화에 따른 원심압축기의 공력성능 특성에 관한 수치 연구," 한국전산유체공학회지, 제15권, 제3호, pp.60-65.
- [6] 2007, 김세미, 박준영, 안국영, 백제현, "반응면기법을 이용한 원심압축기 최적설계," 한국전산유체공학회 추계학술대회논문집, pp.92-99.
- [7] 1996, Harada, H., "Study of a Surge-Free Centrifugal Compressor with Automatically Variable Inlet and Diffuser Vanes," *ASME-Paepr* No. 96-GT-153.
- [8] 1987, Simon, H, Wallmann, T. and Monk, T., "Improvements in Performance Characteristics of Single-Stage and Multistage Centrifugal Compressor s by Simultaneous Adjustments of Inlet Guide Vanes and Diffuser Vanes," *J. Turbomachinery*, Vol. 109, pp.41-47.
- [9] 2010, 성병일 외 10인, "1200kW급 고마력 터보블로워 개발," 지방혁신사업 중간보고서.
- [10] 2009, ANSYS CFX-Solver Modeling Guide. Version 12.1, ANSYS, Inc.