

CFD기반 IGV 각도에 따른 원심압축기 성능 특성 분석

손승현* · 김무성* · 김보경* · 주원구*[†] · 이호곤** ·
박창표** · 박준영*** · 서정민*** · 박세진*** · 정희찬***

CFD-based Analysis of the Effect of IGV Angle on the Performance Characteristics of a Centrifugal Compressor

Seung Hyeon Son*, Moo Sung Kim*, Bo Kyoung Kim*, Won-Gu Joo*[†], Ho Gon Lee**,
Chang Pyo Park**, Jun Young Park***, Jeong Min Seo***, Sejin Park***, Heechan Jeong***

Key Words : Centrifugal Compressor(원심압축기), Inlet Guide Vane(입구안내베인), Performance Characteristics(성능특성), CFD(전산 유체역학)

ABSTRACT

In this study, the effects of inlet guide vane (IGV) angle variation on the performance and internal flow characteristics of an industrial centrifugal compressor were investigated using steady-state CFD analysis. Numerical simulations were conducted using ANSYS CFX for IGV angles of 0°, 20°, and 40°. The performance curves, component-wise entropy rise, and internal flow fields at the best efficiency point (BEP) of each IGV angle were compared. As the IGV angle increased, the circumferential component of absolute velocity at the impeller inlet increased, reducing the impeller work and shifting the performance curves and BEP toward lower flow rates. At the BEP of the 40° case, the flow rate, total pressure ratio, and efficiency decreased by 17.6%, 7.7%, and 1.8%, respectively, relative to the 0° case. Increasing the IGV angle promoted flow separation and entropy generation within the IGV passage, particularly at 40°, and also increased the diffuser loss owing to changes in the diffuser inlet flow condition. Although the impeller incidence angle at mid-span for the 40° case differed by approximately 5° from those for the 0° and 20° cases, no distinct leading-edge recirculation was observed, and the overall impeller entropy rise remained nearly unchanged. These results demonstrate a trade-off between shifting the performance curve and BEP toward lower flow rates and the accompanying reductions in pressure ratio and efficiency.

1. 서론

원심압축기는 다양한 산업 분야에서 널리 사용되는 터보 기계로, 운전 조건에 따라 성능과 안정성이 크게 변화하는 특성을 가진다. 특히 실제 운전 환경에서는 설계점 이외의 영역에서 운전되는 경우가 많으며, 이로 인해 효율 저하 및 불안정 유동이 발생할 수 있다⁽¹⁾. 따라서 탈설계 조건에서의 성능 제어 및 안정성 확보는 원심압축기 설계 및 운전에서 중요한 문제로 인식되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대표적인 방법 중 하나로 Inlet Guide Vane(IGV)이 활용된다.

IGV는 압축기 입구에서 유입 유동의 각도를 조절함으로써 임펠러 입구 유동의 속도삼각형을 변화시키고, 이를 통해 유량 및 성능을 제어할 수 있다⁽²⁻⁴⁾.

Fig. 1은 서지와 초크에 의해 제한되는 일반적인 터보압축기의 운전영역을 나타내며, Fig. 2는 IGV 각도 조절에 따라 압축기의 성능곡선과 최고효율점이 이동하는 것을 개략적으로 보여준다. IGV 각도 변화는 임펠러 입구에 형성되는 예선

* 연세대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Yonsei University)

** 대주기계(Daejoo Machinery)

*** 한국기계연구원(Korea Institute of Machinery and Materials)

[†] 교신저자, E-mail : joo_wg@yonsei.ac.kr

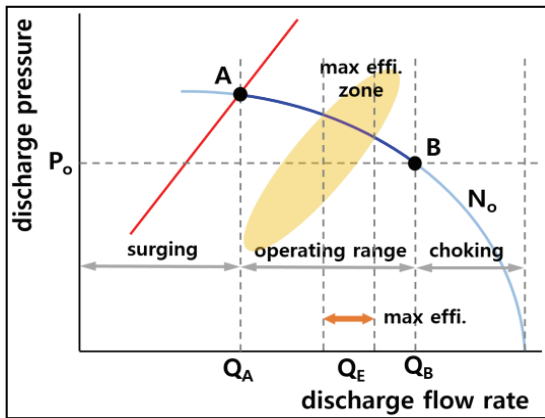


Fig. 1 Typical operating range of a turbocompressor

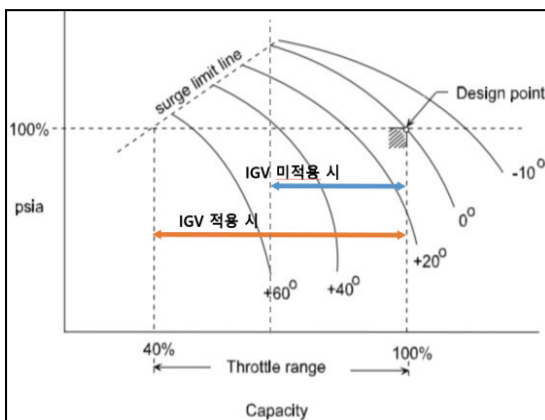


Fig. 2 Operating range with IGV control

회(pre-swirl)와 입사각에 직접적인 영향을 미치므로, 압축기의 성능과 내부 유동 구조에도 중요한 변화를 유발한다.

따라서 IGV 각도 변화가 임펠러 입구 유동 특성 및 내부 유동 구조에 미치는 영향, 그리고 이에 따른 효율 변화의 물리적 원인에 대한 연구가 필요하다.

선행연구에서는 IGV 각도 조절에 따른 유량 제어와 압축기 성능곡선의 변화가 주로 제시되어 왔다⁽²⁻⁴⁾. 본 연구는 이러한 거시적인 성능 변화의 확인에 그치지 않고, 실제 산업용 원심압축기의 IGV, 임펠러 및 베인 디퓨저 영역을 대상으로 성능 변화의 물리적 원인과 구성요소별 손실 발생 특성을 분석하고자 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 해석 모델

본 연구의 해석 대상은 실제 IGV 형상과 임펠러 및 디퓨저를 포함한 원심압축기이며, Fig. 3은 각 구성요소의 수치 해석 영역을 나타낸다. 각 구성요소는 단일 유로로 해석 영역을 구성하였다. 베인 디퓨저는 임펠러 출구 유동 조건의 영향을 직접적으로 받으며 압력 회복 및 손실 발생에 중요한

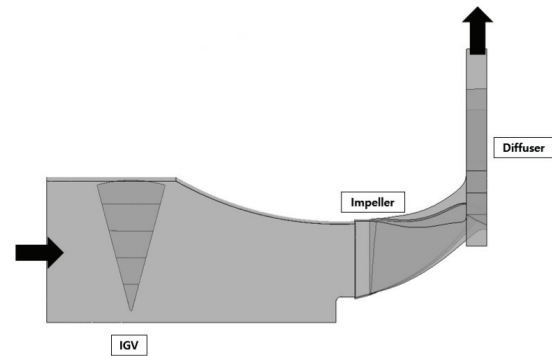


Fig. 3 Computational model

역할을 하므로 해석 영역에 포함하였다.

볼류트는 원주방향으로 비주기적인 형상을 가지며, IGV 각도 변화가 임펠러 유동에 미치는 영향을 확인하기 위한 목적에서는 불필요하다.

따라서 본 연구에서는 연구 목적을 고려하여 볼류트를 제외하고 IGV 입구부터 디퓨저 출구까지를 해석영역으로 설정하였다.

2.2 격자 구성

해석 모델의 격자는 Fig. 4와 같이 구성하였으며, ANSYS Meshing과 ANSYS TurboGrid를 이용하여 생성하였다.

Table 1은 임펠러 및 디퓨저의 격자 의존도 검토 결과를 나타내며, 각 격자계의 압력비와 효율은 최종 선정 격자 결과를 기준으로 비교하였다.

임펠러와 디퓨저는 벽면의 첫 번째 격자 높이를 0.001 mm로 설정하여 임펠러 및 디퓨저 해석 영역의 y^+ 가 2 이하로 유지되는 것을 확인하였고, 격자 의존도 결과를 통해 계산 정확도와 계산 비용을 고려해 임펠러 92만 개, 디퓨저 95만 개로 선택하였다.

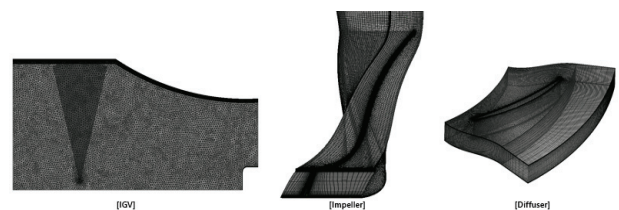


Fig. 4 Mesh configuration of the computational model

Table 1 Grid independence test results for the impeller and diffuser

총 격자 개수	기존 격자 대비 차이[%]	
	Π_{tt}	효율
1,300,000	-0.50 %	-0.35 %
1,870,000	-	-
2,300,000	0.18 %	0.11 %

Table 2 Grid independence test results for the IGV

IGV 격자 개수	기준 격자 대비 차이[%]	
	Π_{tt}	효율
70,000	0.14 %	0.01 %
240,000	-0.01 %	0.00 %
310,000	-	-
410,000	0.04 %	0.01 %

Table 2는 IGV의 격자 의존도 검토 결과를 나타낸다. 임펠러 및 디퓨저 격자는 187만 개로 고정하고 IGV의 격자 수를 변경해 격자 의존도를 검토하였다.

IGV 영역 또한 y^+ 가 2 이하가 되도록 벽면의 첫 번째 격자 높이를 설정하였고, 격자 의존도 결과를 통해 31만 개 격자를 선택하였다.

2.3 해석 방법

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX 2022 R2를 사용해 수치해석을 수행하였다.

입구 경계조건은 전압력과 전온도를 적용하였으며, 입구 난류강도는 5%로 설정하였다. 출구 경계조건은 질량유량 조건을 적용하였다.

난류모델은 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델을 사용하였다. SST 모델은 벽면 근처에서는 $k-\omega$ 모델의 특성을 사용하고, 자유유동 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델의 특성을 적용하여 박리 유동 예측에 유리한 장점을 가진다⁽⁵⁾.

IGV와 디퓨저는 정지영역으로, 임펠러는 회전영역으로 설정하였다. 각 정지영역과 회전영역은 Stage 인터페이스를 적용하였다.

IGV 각도 변화가 원심압축기 성능 및 유동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 IGV 형상의 각도를 변화시켜 해석을 수행하였다. IGV 각도는 0° , 20° , 40° 의 세 가지 조건에 대해 설정하였다. 각 조건에서의 성능 및 유동 해석 결과를 비교하였으며, 모든 해석은 정상상태(steady-state) 조

건에서 수행되었다.

3. 해석 결과

3.1 성능곡선 분석

3.1.1 압력비 곡선 및 효율 곡선

정상상태 해석만으로는 안정 운전 한계를 판단하기는 어려우므로 운전 한계유량을 정의하지는 않았다. 본 연구에서는 각 IGV 조건에서 수렴해가 확보된 유량 범위 내에서 성능곡선의 변화를 비교하였다.

IGV 각도 변화에 따른 정규화된 압력비 및 효율 곡선을 비교한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

압력비는 디퓨저 출구 전압과 IGV 입구 전압의 비이며, 효율 또한 IGV 입구부터 디퓨저 출구까지 영역에 대한 효율이다.

유량, 압력비, 효율은 IGV 각도 0° 의 최고효율점에서의 값으로 정규화하였으며, 아래 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\dot{m}_{normalized} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{BEP,0^\circ}} \quad (1)$$

$$\Pi_{tt,normalized} = \frac{\Pi_{tt}}{\Pi_{tt,BEP,0^\circ}}, \quad \Pi_{tt} = \frac{P_{t,out}}{P_{t,in}} \quad (2)$$

$$\eta_{tt,normalized} = \frac{\eta_{tt}}{\eta_{tt,BEP,0^\circ}} \quad (3)$$

IGV 각도가 증가함에 따라 전체 압력비가 감소하는 경향을 보였으며, 동시에 압축기의 성능곡선이 저유량 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 IGV 각도 증가에 따라 유입 유동에 예선회 유동(pre-swirl)이 형성되면서 임펠러 입구의 원주 방향 속도 성분이 증가하고, 그 결과 임펠러에서 발생하는 압력상승량이 감소하기 때문으로 판단된다^(1,2).

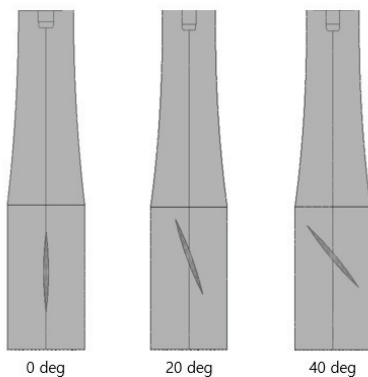


Fig. 5 IGV geometries at different angles

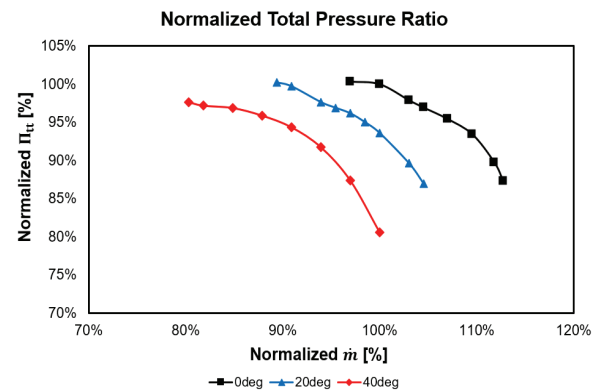


Fig. 6 Pressure ratio curves at different IGV angles

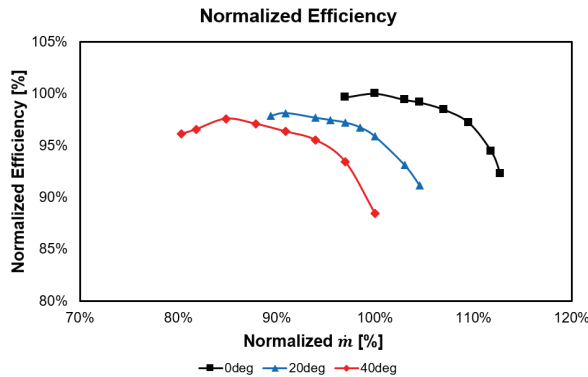


Fig. 7 Efficiency curves at different IGV angles

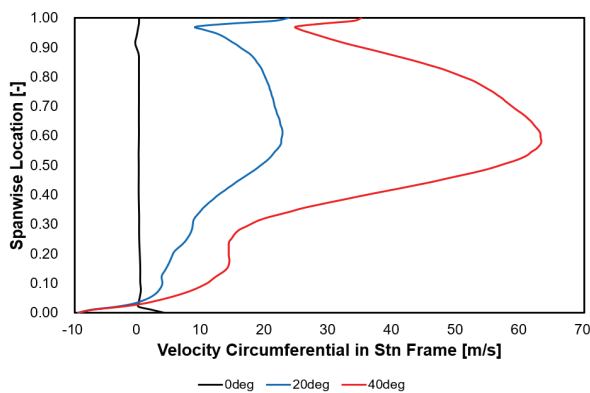


Fig. 8 Spanwise distributions of circumferential absolute velocity at the impeller inlet for different IGV angles

또한 효율 곡선에서도 IGV 각도가 증가할수록 최고효율이 감소하는 경향을 보였으며, 최고효율점(BEP)이 저유량 영역으로 이동하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 IGV 각도 변화가 단순히 운전점을 이동시키는 것뿐만 아니라 압축기 성능 자체에도 영향을 미침을 의미한다.

Fig. 8은 IGV 각도 변화에 따른 임펠러 입구에서의 원주 방향 절대속도 분포를 나타낸 것이다. IGV 각도가 증가함에 따라 임펠러 입구에서의 원주 방향 절대속도가 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 IGV에 의해 유입 유동이 회전 방향으로 편향된 결과이다.

이에 따라 오일러 터보기계 방정식에 의한 임펠러 일이 감소하여 압력비가 낮아졌다. 또한 입구 상대유동각의 변화로 최적운전점과 최고효율점이 저유량 방향으로 이동하였다.

3.2 IGV 각도별 최고효율점 해석 결과 비교

3.2.1 IGV 각도별 성능 비교

Fig. 9는 IGV 각도별 최고효율점에서의 유량, 압력비, 효율의 변화를 나타낸다. 각도별 최고효율이 나타나는 유량은 IGV 각도 20°, 40°에서 각각 0° 대비 88.2%, 82.4%로 나타났다.

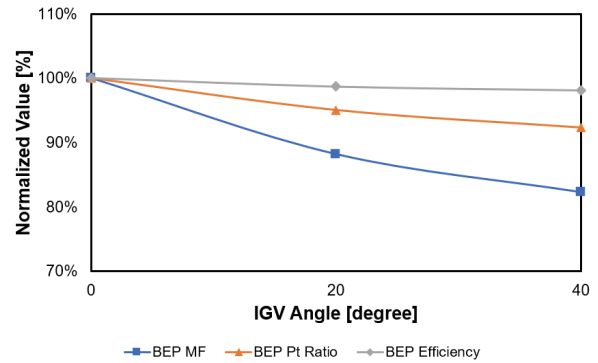


Fig. 9 Variations in flow rate, pressure ratio, and efficiency with IGV angle

Table 3 Component losses at the best efficiency point for different IGV angles

IGV 각도	각 구성요소 손실[단위 : $J/(kg \cdot K)$]			
	IGV 손실	임펠러 손실	디퓨저 손실	전체 손실
0°	0.59	37.68	12.95	51.22
20°	0.72	37.75	14.18	52.65
40°	2.45	37.31	14.20	53.96

압력비는 0° 대비 95.1%, 92.3%로 각각 4.9%와 7.7% 감소하였으며, 효율은 98.7%, 98.2%로 각각 1.3%, 1.8% 감소하였다.

이와 같은 결과로부터 IGV 각도 조절을 통해 압축기의 최고효율점을 저유량 방향으로 이동시킬 수 있으나, 이에 따른 최고효율과 압력비의 감소가 수반된다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 압축기 구성요소별 손실 비교

Table 3은 IGV 각도에 따른 최고효율점에서의 구성요소별 손실을 나타낸다. 각 구성요소 출구 엔트로피와 입구 엔트로피의 차이로 손실을 계산하였으며, 전체 손실은 각 구성요소 손실의 합으로 나타낸다. IGV 각도가 증가함에 따라 IGV 통로 내 엔트로피가 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 40°에서 큰 폭으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

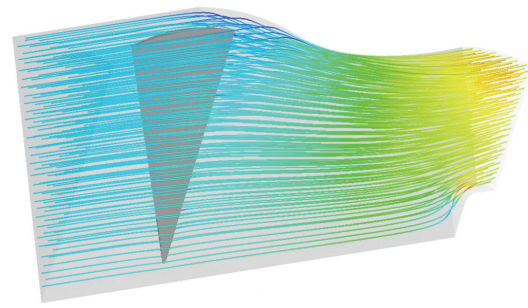
임펠러 손실은 거의 비슷하게 나타나며, 디퓨저 손실은 IGV 20°, 40°에서 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 IGV 내부 유동장 비교

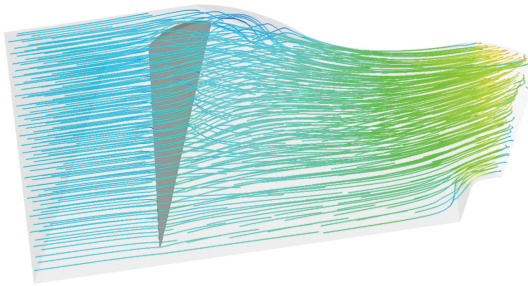
Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 IGV 40°에서 급격한 유동박리가 발생하여 손실이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 IGV 각도 증가가 단순히 유입 유동각을 변화시킬 뿐만 아니라, IGV 통로 내부의 유동박리와 추가적인 손실을 유발함을 보여준다. 이에 따른 엔트로피 증가가 발생하며 효율 감소의 원인으로 작용하는 것으로 보인다.

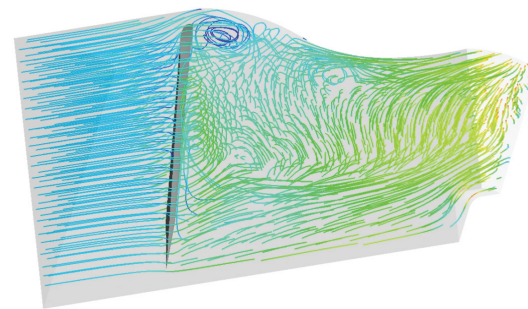
Fig. 11은 IGV 통과 이후의 엔트로피를 나타낸다. 0°에서



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Streamlines for IGV angles of (a) 0°, (b) 20°, and (c) 40°

는 다른 각도에 비해 상대적으로 낮은 손실이 나타났으며, 20°에서는 팁 간극을 통해 흘러나온 유동에 의해 슈라우드 부근에서 국부적인 손실이 발생하고 중간 스패 부근에서의 유동 박리에 의한 엔트로피 증가가 관찰된다.

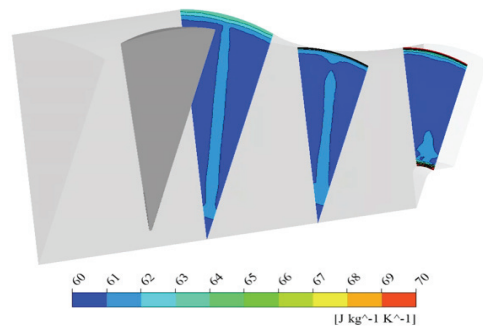
40°에서는 20°에서 나타난 손실 패턴이 더 크게 나타나며 손실량이 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 IGV 각도가 증가함에 따라 입사각 증가에 의한 유동 박리가 발달하면서 손실이 급격하게 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.4 임펠러 내부 유동장 비교

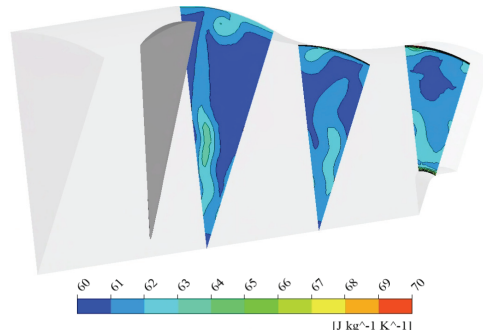
Fig. 12는 각 IGV 조건의 최고효율점에서 임펠러 입구의 입사각(incidence angle) 분포를 나타낸다.

중간 스패 부근에서 IGV 각도 40° 조건의 입사각은 0°, 20° 조건보다 약 5° 낮게 나타났다.

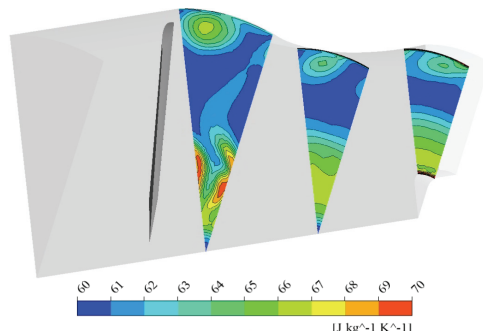
Fig. 13은 입사각이 가장 크게 차이 나는 중간 스패 부근에서의 속도 분포를 나타낸다. IGV 각도 40° 조건에서 IGV



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Entropy distributions for IGV angles of (a) 0°, (b) 20°, and (c) 40°

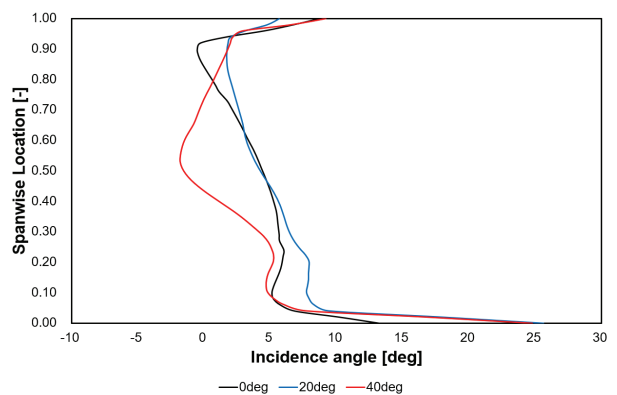


Fig. 12 Spanwise distributions of impeller inlet incidence angle for different IGV angles

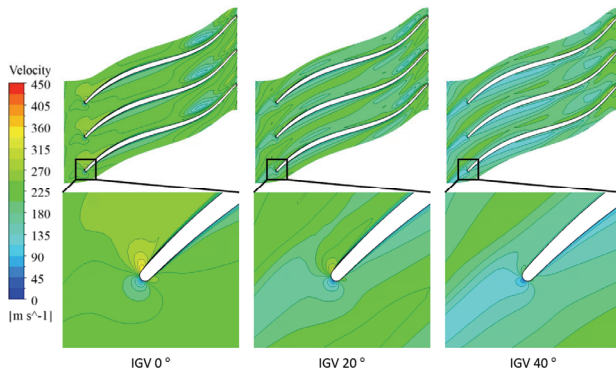


Fig. 13 Relative velocity distributions at mid-span at the best efficiency point for different IGV angles

각도 0°와 20°일 때 보다 입사각이 5° 정도 낮게 나타났으나, 임펠러 전연 부근에서 뚜렷한 역류나 재순환 영역은 관찰되지 않았다.

3.2.5 디퓨저 내부 유동장 비교

Table 4는 IGV 각도별 디퓨저 입구 반경/원주 방향 속도를 나타낸다. 반경 방향 속도는 0°와 20°일 때는 비슷하게 나타나며 40°일 때 조금 크게 나타났다. 원주 방향 속도는 각도가 커질수록 원주 방향 속도가 증가하는 경향을 보였다.

Table 4 Radial and circumferential velocities at the diffuser inlet for different IGV angles

IGV	반경 방향 속도	원주 방향 속도
0°	136.23 m/s	271.87 m/s
20°	135.96 m/s	283.12 m/s
40°	139.68 m/s	287.12 m/s

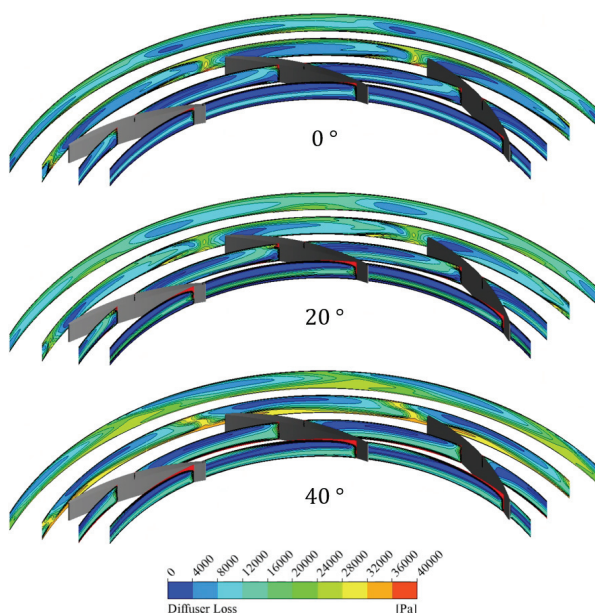


Fig. 14 Diffuser loss distributions for different IGV angles

Fig. 14는 각 IGV 조건에 따른 디퓨저 손실 분포를 나타낸다. 손실은 디퓨저 입구 질량평균 전압력과 극부 전압력의 차이를 나타내며 아래 식 (4)와 같이 정의한다.

$$Loss = P_{t, diffuser \ inlet} - P_t \quad (4)$$

20°와 40°일 때, 디퓨저 전연 슈라우드 부근에서 손실이 커지면서 이에 따른 손실 증가가 출구까지 이어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 디퓨저 입구에서의 원주 방향 속도의 증가로 인해 디퓨저 입사각이 변화한 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFD 해석을 이용하여 IGV 각도 변화가 원심압축기의 성능 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) IGV 각도가 증가함에 따라 임펠러 입구의 원주방향 절대속도가 증가하고 임펠러 일이 감소하여 성능곡선과 최고효율점이 저유량 방향으로 이동하였다. IGV 20°와 40° 조건의 최고효율 유량은 0° 조건 대비 각각 88.2%와 82.4%로 나타났으며, 압력비는 4.9%와 7.7%, 효율은 1.3%와 1.8% 감소하였다.
- 2) IGV 각도가 증가할수록 통로 내부의 유동 박리와 후류가 발달하였으며, 특히 40°에서 중간 스펠 박리와 팁 간극 누설 유동에 의해 IGV 손실이 크게 증가하였다. 디퓨저에서도 입구 원주방향 속도와 입사각의 변화로 전연 슈라우드 부근의 손실이 증가하였다.
- 3) IGV 40° 조건의 중간 스펠 임펠러 입사각은 0°와 20°보다 약 5° 낮았으나, 전연 부근에서 뚜렷한 역류나 재순환은 나타나지 않았으며 임펠러 전체 손실 변화도 제한적이었다. 따라서 IGV는 성능곡선을 저유량 방향으로 조절할 수 있으나, 압력비와 효율 감소 및 IGV와 디퓨저의 손실 증가를 함께 고려하여 각도를 선정할 필요가 있다.
- 4) 향후 연구에서는 IGV 각도를 5° 또는 10° 간격으로 세분화하여 각도별 성능곡선을 추가로 확보하고, 동일 유량에서의 압력비와 효율 및 구성요소별 손실을 비교할 예정이다. 이를 통해 서로 다른 IGV 각도의 효율 곡선이 교차하는 유량 구간을 확인하고, 운전 유량별 최대 효율과 요구 압력비를 만족하는 최적 IGV 운전 스케줄을 도출하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 '가변형 고효율 유체기기 핵심 기술

및 운영 시스템 개발' 과제(No. 2021202080026C)의 연구
결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- (1) Whitfield, A., Abdullah, A.H., 1997, "The performance of a centrifugal compressor with high inlet prewhirl," International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, ASME.
- (2) Rodgers, C., 1991, "Centrifugal compressor inlet guide vanes for increased surge margin," Journal of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 696~702.
- (3) Simon, H., Wallmann, T., Mönk, T., 1987, "Improvements in performance characteristics of single-stage and multistage centrifugal compressors by simultaneous adjustments of inlet guide vanes and diffuser vanes," Journal of Turbomachinery, Vol. 109, pp. 41~47.
- (4) Ishino, M., Iwakiri, Y., Bessho, A., Uchida, H., 1999, "Effects of variable inlet guide vanes on small centrifugal compressor performance," International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, ASME.
- (5) Menter, F.R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.