

Ported Shroud 원심압축기 성능에 미치는 운용고도의 영향

전상욱*[†] · 임병준* · 강영석*

The Effects of Operating Altitude on the Performance of the Ported Shroud Centrifugal Compressor

Sangook Jun*[†], Byung Jun Lim*, Young Seok Kang*

Key Words : Casing Treatment(케이싱 트리트먼트), Centrifugal Compressor(원심압축기), Operating Altitude(운용고도), Ported Shroud(포트 슈라우드), Reynolds Number Effect(레이놀즈 수 영향)

ABSTRACT

This research is performed to investigate the effect of operating altitude on the performance of the ported shroud centrifugal compressor. The numerical analysis using commercial software is performed for the turbocharger compressor and it is compared with a non-ported shroud and a ported shroud cases at ground and high altitude. From these results, pressure ratios and efficiencies are reduced by 2~4% and 2.5%p at high altitude (18 km), respectively, because of Reynolds number effect. Moreover, it is confirmed that the performance of the ported shroud compressor is not better than that of no port, but the ported shroud is capable of maintaining the mass flow rate at the stall point with respect to the variation of the altitude. Therefore, the application of the ported shroud is reasonable in terms of the stable operation of the compressor at high altitude of 18 km.

1. 서 론

최근 무인기에 대한 관심이 높아지면서 이와 더불어 무인 기용 엔진 개발에 대한 요구도 증가하고 있다. 이들 가운데 왕복엔진의 경우 9 km 이상에서 운용될 때 주위 공기의 밀도는 지상에 비해 1/3 이하로 낮아지고, 18 km의 고고도에서는 1/10 만큼 작아지기 때문에, 왕복엔진에 지상 대기상태와 유사하게 공기를 공급하기 위해서는 별도의 가압시스템인 터보차저가 반드시 이용되어야 한다. 하지만 자동차용 터보차저를 이용할 경우 압력비나 유량에 한계가 있어 이들을 병렬 혹은 직렬로 여러 개를 연결한 터보차저 시스템을 구성하여 사용해야 한다.^(1,2) 또한 시스템의 안정적인 운용을 위해서 압축기의 스톨 마진(stall margin)을 확보할 수 있는 케이싱 트리트먼트(casing treatment)가 필요하다.

케이싱 트리트먼트는 압축기 날개 팁과 맞닿는 케이싱을 적절히 처리하여 유동을 재순환시킴으로써 스톨 현상을 보다 저유량에서 발생하도록 하여 압축기의 작동영역을 확장

시키는 방법을 말한다. 압축기의 날개 끝단 유동과 주유동 사이의 상호작용으로 인해 발생하는 유동박리를 억제/지연 시킴으로써 이를 가능하게 한다.⁽³⁾ 케이싱 트리트먼트 방법으로는 압축기 입구에 환형의 그루브(groove)를 만드는 방법, 이 그루브 안에 리세스 베인(recess vane)을 설치하는 방법, 임펠러 전연 이후에 슬릿 slit)을 만들어 공기를 압축기 입구 쪽으로 보내주는, 즉 재순환시키는 방법 등 다양한 적용사례가 있다.⁽⁴⁾ 이들 방법 중 마지막에 언급한 슬릿을 만들어 공기를 재순환시키는 방법은 가성비가 높아 대부분의 터보차저 압축기에 포트 슈라우드(ported shroud)라는 이름으로 사용되고 있다.

포트 슈라우드와 관련된 케이싱 트리트먼트 연구는 최근에도 활발하게 수행되고 있다. Gao 등⁽⁴⁾은 recess vane, circumferential groove, bleeding groove의 3 종류의 케이싱 트리트먼트 방법을 서로 비교하였으며, 이들 중 recess vane과 포트 슈라우드와 유사한 bleeding groove가 3~4%의 효율 저하는 발생하지만 스톨 발단 유량을 20% 가까이 줄

* 한국항공우주연구원 엔진부품연구팀(Engine Components Research Team, Korea Aerospace Research Institute)

† 교신저자, E-mail : sangookjun@kari.re.kr

일 수 있음을 보였다. Kim 등⁽⁵⁾은 상/하류의 슬릿 위치, 하류 슬릿 폭 등의 변화에 의한 압축기 작동 범위의 영향을 분석하고, 작동 범위가 19.9% 향상되는 최적의 형상을 찾았다. Park 등⁽⁶⁾은 기존의 포트 슈라우드에 베인(vane)을 설치하여 효율 저하를 최소화하면서 스톨 마진을 3%까지 향상시켰다. Zheng 등⁽⁷⁾은 비축대칭인 벌류트의 영향을 고려할 때 슬릿의 위치 역시 비축대칭이 되어야 한다고 제안하였으며, 축대칭형태인 슬릿의 경우와 비교 시 스톨 발단 유량이 최대 10%까지 작아질 수 있음을 보였다. 이와 같이 포트 슈라우드 하우징을 가지는 압축기에 대한 연구는 지상조건에 대한 해석, 실험, 설계에 이르기까지 다양하게 진행되고 있다. 이와 더불어 중고도 이상에서는 레이놀즈 수 영향이 존재하기 때문에 고도에 따른 현상을 분석하는 것은 중요한 연구 중 하나이다.

따라서 본 연구에서는 포트 슈라우드 압축기를 대상으로 수치해석을 통해 고도의 변화에 따른 압축기 성능 변화를 살펴보고자 한다. 또한 케이싱 트리트먼트를 적용하지 않은 압축기에 대한 해석도 같이 수행하여 포트 슈라우드 유무에 따른 압축기 성능 변화에 대해 비교 검토할 것이다.

2. 문제정의 및 수치해석

2.1 Ported Shroud 압축기

본 연구에서 사용할 터보차저 압축기는 참고문헌 8에 있는 GTX2867R 모델로 압축기 부분은 Fig. 1과 같으며 11개의 블레이드를 가지는 임펠러, 베인리스 디퓨저, 벌류트로 구성되어 있다. 압축기 입구 쪽에 포트가 있고, 이 포트 안에는 임펠러 쪽으로 공기가 드나들 수 있는 환형의 슬릿이 존재한다. 스톨 영역 부근에서는 임펠러를 통과하는 공기 중 일부가 이 슬릿을 통해 포트를 거쳐 다시 압축기 입구 쪽으로 재순환하여 임펠러 블레이드 팁 부근에서의 모멘텀을 증가시켜 압축기의 작동영역을 확장시켜 준다. 이러한 현상은 임펠러 팁에서 발생하는 이차유동의 영향으로 스톨이 발생하고 유동이 정체되면서 입구에 비해 압력이 높아져 결국 유동은 임펠러에서 포트 쪽으로 흐르게 되는 것이다. 반대로 초킹(choking) 영역에서는 임펠러에서의 압력이 압축기 입구보다 낮아 유동이 임펠러 쪽으로 흘러들어 오게 된다.

2.2 수치해석 및 경계조건

Fig. 2는 포트 슈라우드 압축기와 포트가 없는 압축기의 계산 격자계를 나타낸 것이다. 두 모델 모두 유동이 들어오는 입구 도메인, 회전하는 임펠러 도메인, 고정단인 벌류트 도메인(베인리스 디퓨저 포함)으로 크게 3부분으로 나누어 입구와 벌류트 도메인은 정지 좌표계(stationary frame)으

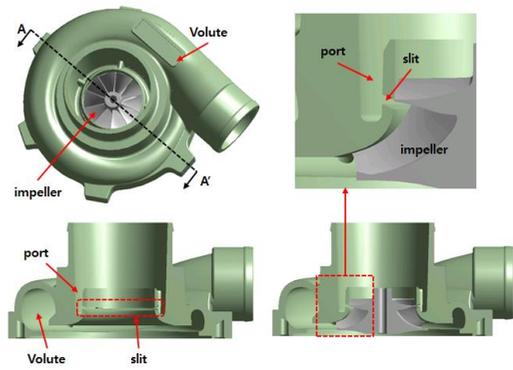
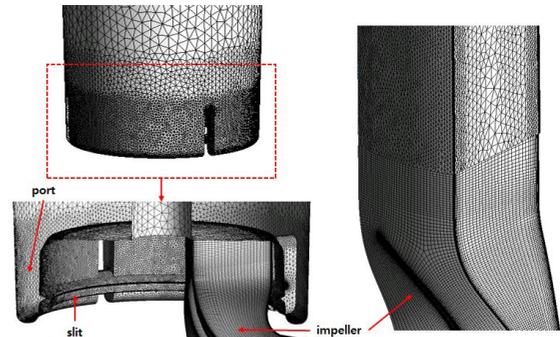
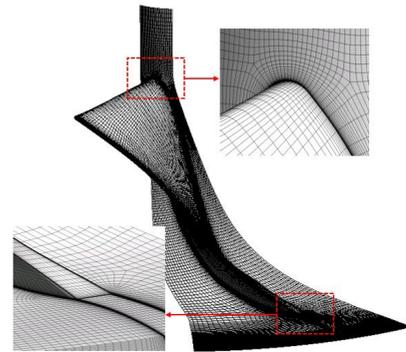


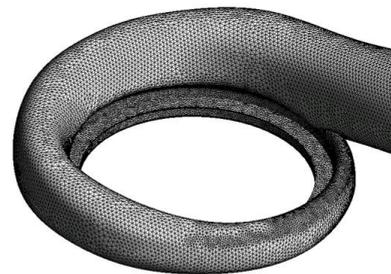
Fig. 1 Centrifugal compressor with the ported shroud



(a) Inlet domain (Left: ported shroud, Right: no port)



(b) Impeller domain



(c) Volute domain

Fig. 2 Mesh systems of ported shroud & no port compressors

로, 임펠러는 회전 좌표계(rotational frame)으로 구분하였다. 임펠러와 벌류트 도메인의 격자는 포트 유무와 상관없이 동일한 격자를 사용하였으며, 포트가 없는 경우 입구 도메인

Table 1 Criteria of boundary & operating conditions

Inflow	Total pressure & temperature
Outflow	Mass flow rate
Wall	Non-slip
Interface	Average stage
Rotating speed	135,000 rpm
Altitude	0 km, 18 km

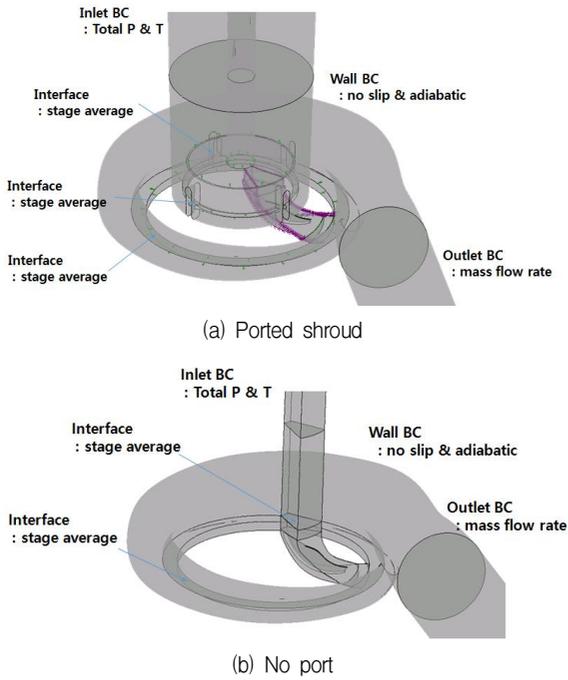
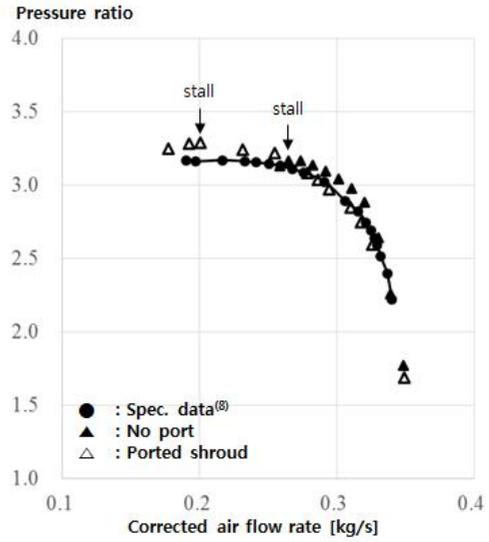


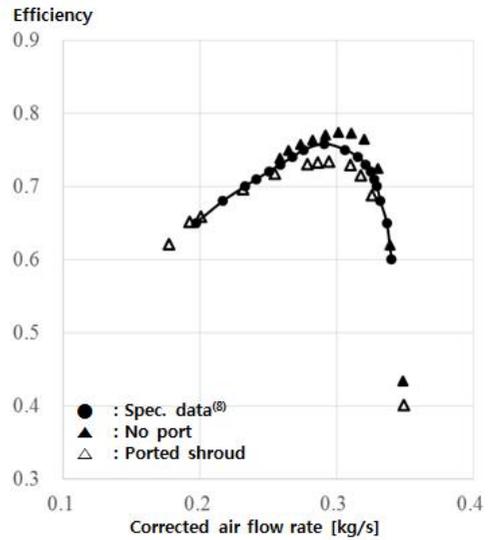
Fig. 3 Criteria of boundary conditions of the compressors

은 포트와 슬릿 부분을 제거하여 사용하였다. 임펠러 도메인은 정렬 격자를, 입구와 별류트 도메인은 비정렬 격자를 이용하였으며 슬릿을 포함한 벽면에 10개의 레이어(layer)를 쌓았다. 두 모델 모두 노드 기준으로 255만개 수준의 메시가 사용되었다. 수치해석을 위해 ANSYS사의 CFX v14를 이용하였으며, 난류모델은 SST k- ω 모델을 사용하였다. 경계조건과 해석조건은 Table 1과 Fig. 3에 정리하였다.

이와 같이 정의된 내용을 바탕으로 터보차저 압축기의 카탈로그⁽⁸⁾ 상의 데이터와 해석결과를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 스톨 부근에서 압력비가 약간 차이를 보이고 있지만 약 5% 이내이고 전체적인 경향이 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 또한 포트가 없는 경우 압력비와 효율에서 2~4%의 상승은 있지만 스톨이 포트 슈라우드에 비해 약 24.3% 큰 유량에 발생하고 있어 기존의 참고문헌⁽⁴⁻⁷⁾의 내용과 일치하는 경향을 보이는 것도 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는 이 장에서 기술된 수치해석의 방법을 이용해 고도에 따른 포트의 영향을 확인할 것이다.



(a) Pressure ratio

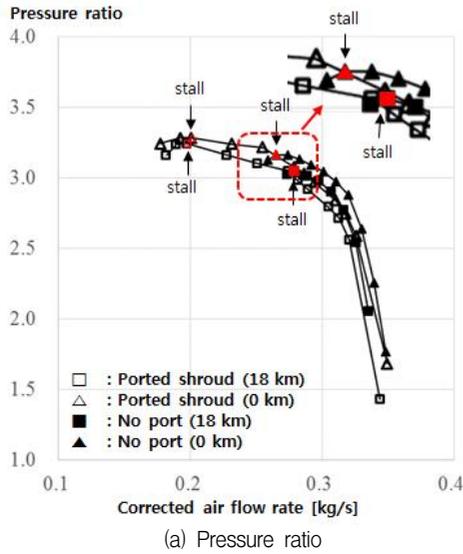


(b) Efficiency

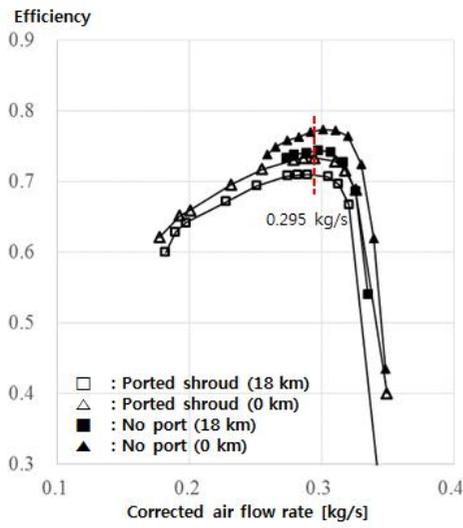
Fig. 4 Comparison of performance data from numerical simulations with those from a product catalogue⁽⁸⁾ (reference conditions: 293 K, 1 atm)

3. 고도에 따른 압축기 해석 결과

본 장에서는 고도에 따라 포트 슈라우드가 터보차저 압축기에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 135,000 rpm일 때 고도가 0 km, 18 km에서 유량에 대한 압력비 및 효율 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 이로부터 다음과 같은 현상을 관찰할 수 있다. 하나는 고도가 높아지면 레이놀즈 수 영향 때문에 유량이 커질수록 압력비 및 효율이 저하된다는 것이고, 다른 하나는 스톨 발단 유량의 경우 포트 슈라우드 압축기는 고도에 따라 거의 일정하게 유지되지만 케이싱 트리트먼트가 없는 압축기는 0.014 kg/s 증가한다는 것이다. 이것은 포



(a) Pressure ratio



(b) Efficiency

Fig. 5 Variation of compressor performance with altitude

Table 2 Compressor performance at 0.295 kg/s and the mass flow rate at the stall onset point

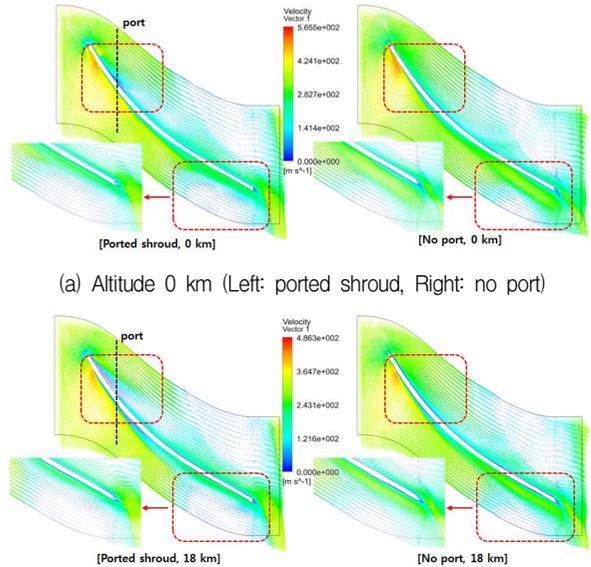
Altitude [km]	0		18	
	o	x	o	x
Re number*	2.42×10^5	2.86×10^5	2.53×10^4	2.74×10^4
Pressure ratio	2.97	3.09	2.92	2.98
Efficiency [%]	73.3	77.0	71.0	74.4
Mass flow rate [kg/s]**	0.200	0.265	0.197	0.279

* Based on compressor inlet

** Corrected mass flow rate @ stall onset

트 슈라우드의 적용으로 슬릿을 통해 유동이 재순환됨으로써 고도조건에서의 스톨을 지연시킨 것으로 판단된다.

Table 2에 포트 슈라우드 압축기의 지상조건에서 최고 효율점인 유량 0.295 kg/s를 기준으로 고도조건과 포트의 유



(a) Altitude 0 km (Left: ported shroud, Right: no port)

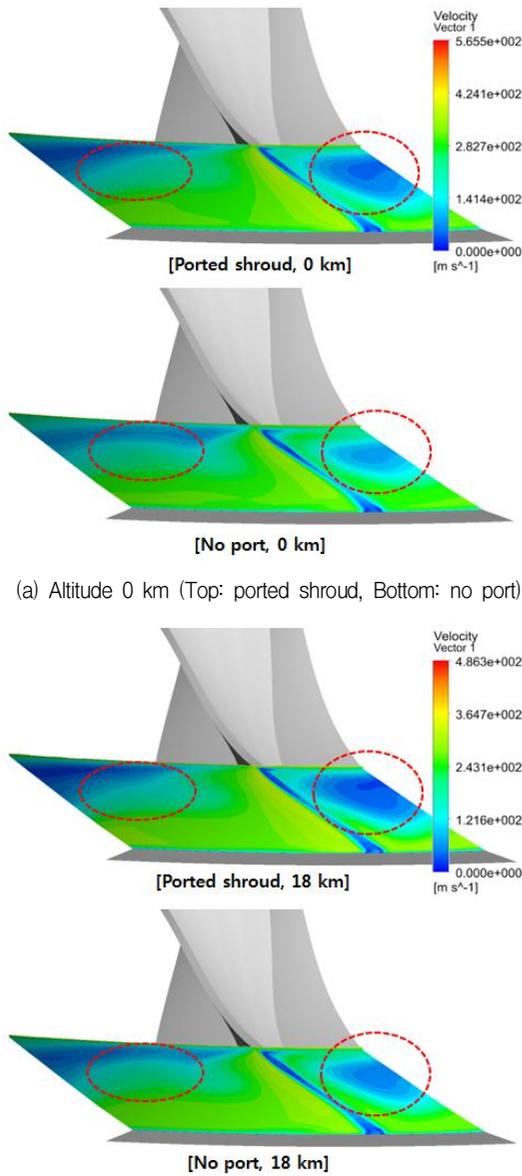
(b) Altitude 18 km (Left: ported shroud, Right: no port)

Fig. 6 Velocity distribution at span 90% (135,000 rpm, 0.295 kg/s)

무에 따른 압축기의 성능을 정리하였다. 여기서 포트가 없다는 것은 케이싱 트리트먼트가 적용되지 않은 일반적인 슈라우드 하우징을 가진 압축기를 의미한다.

포트의 유무와는 무관하게 두 압축기 모델 모두 고도가 높아짐에 따라 레이놀즈수는 지상조건을 기준으로 18 km일 때 1/10 수준으로 낮아지며, 압력비는 포트 슈라우드의 경우 1.7%, 포트가 없는 압축기는 3.5% 감소하고 효율은 두 모델 모두 약 2.5%p 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 포트 슈라우드의 적용 여부에 따른 성능 변화를 살펴보면 지상조건에서는 3.9%, 고도조건에서는 2.2%의 압력비 감소가 발생하고 있으며, 효율은 두 모델 모두 약 3.5%p 감소하였다. 스톨 발달 유량의 경우 지상에서는 24.5%, 고도조건에서는 29.3%의 감소율을 보이고 있어 압력비와 운전영역 확대의 관점에서 봤을 때 지상조건보다는 고도조건에서 포트 슈라우드의 적용이 더 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 6은 span 90% 위치에서 고도별 블레이드 주위의 속도분포를, Fig. 7은 블레이드 후연 부근의 속도분포를 나타낸 것으로, Table 2에서 보여주고 있는 고도 및 포트 유무에 따른 압축기 성능변화에 대한 이유를 보여 주고 있다. Fig. 6의 블레이드 후연 부근에서 발생하고 있는 유동박리는 블레이드 팁에서 발달한 유동에 의한 것으로 그 크기를 보면 지상조건보다는 고도조건일 때, 포트가 없는 것보다는 있는 경우 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7의 빨간 원으로 표기된 부분에서도 나타나고 있으며, 속도가 낮은 영역이 Fig. 6과 같은 경향으로 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고도가 높아짐에 따라 관성력에 비하여 점성력의 영향이 커져, 블레이드 팁에서의 유동이 더 활발하게 발생하여 나타난 현상으로 본 연구에서의 압축기 모델들의 성능 변화



(a) Altitude 0 km (Top: ported shroud, Bottom: no port)

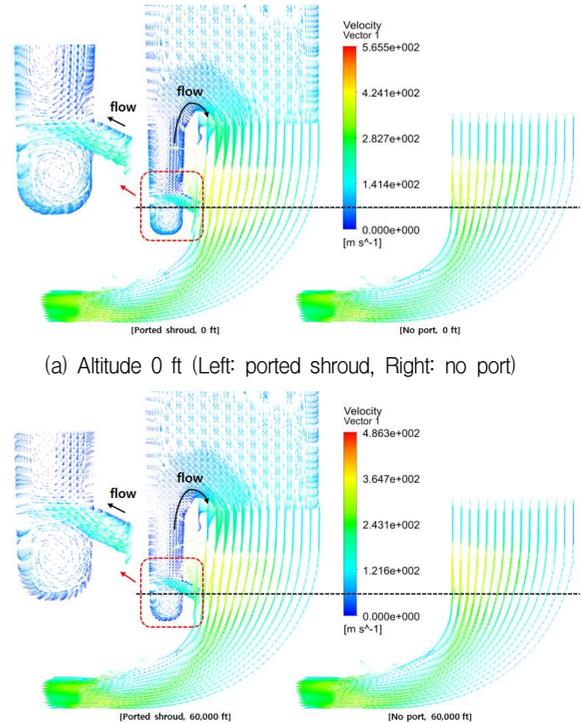
(b) Altitude 18 km (Top: ported shroud, Bottom: no port)

Fig. 7 Velocity distribution at trailing edge of impeller blade (135,000 rpm, 0.295 kg/s)

에 큰 영향을 준 요인이다.

Fig. 8은 포트 내부의 유동을 확인하기 위하여 고도별 자오면에서 속도벡터를 나타낸 것으로, 슬릿을 통해 빠져나간 유동이 다시 임펠러 입구로 유입되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상 때문에 슬릿의 입구 부근의 속도가 포트가 없는 압축기에 비해 상대적으로 높고, Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 포트 슈라우드의 경우 블레이드 전연 부근에서의 박리 발생은 재순환 유동의 유입으로 달라진 유동각에 의한 것임을 예상할 수 있다.

한편 압축기 입구에 비해 유로 안쪽의 압력은 출구 쪽으로 갈수록 점점 높아진다. 그런데 Fig. 5에서 유량 0.295 kg/s



(a) Altitude 0 ft (Left: ported shroud, Right: no port)

(b) Altitude 60,000 ft (Left: ported shroud, Right: no port)

Fig. 8 Velocity distribution at the meridional plane (135,000 rpm, 0.295 kg/s)

은 포트가 없는 경우 스톨 영역에 가깝기 때문에 블레이드 팁에서 이차유동이 활발하게 일어나기 시작하고 속도가 정체되는 구간에서는 압력이 더 높아질 것이다. 이러한 상황에 포트 슈라우드가 적용이 되면 압력이 높아진 부분에 대기와 연결되는 통로가 형성되어 정체된 유동은 포트를 통해 배출되고 결국 유로 안의 유동은 비교적 안정적으로 흐르게 된다. 이와 같이 스톨 영역 근처에서 포트 슈라우드의 역할은 임펠러 운용에 안정성을 확보하는 데 있기 때문에 18 km의 고도조건에서 스톨 발단 유량을 지상조건과 거의 유사한 정도로 유지할 수 있다는 것은 포트 슈라우드 압축기가 고고도 환경에서도 안정적인 운용이 가능함을 의미한다.

4. 결론

지금까지 터보차저 압축기를 대상으로 고도에 따라 포트 슈라우드의 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 입구 도메인의 변경을 통해 포트 슈라우드와 포트가 적용되지 않는 슈라우드에 대해서 해석을 수행하였으며, 해석을 검증하는 과정에서 압력비 및 효율 곡선이 제조사의 카탈로그에 제시된 데이터와 5% 이내로 유사한 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 또한 포트 슈라우드의 경우 포트가 없는 슈라우드에 비해 성능의 감소는 있었지만 스톨 발단 유량이 24.3%까지 줄어들어 다른 연구들과 마찬가지로 압축기의 안정성을 향상시키

는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

한편 고도가 높아지면 레이놀즈 수 영향으로 인해 포트 유무와 무관하게 압력비는 2~4%, 효율은 2.5%p 손실이 발생하였다. 또한 같은 고도에서 포트 슈라우드 압축기는 포트가 없는 것에 비해 압력비 및 효율 역시 2~4% 정도 낮다. 하지만 스톨 지연 효과 및 운용 측면에서는 포트 슈라우드가 적용된 경우 그렇지 않은 경우에 비하여 스톨 발단 유량이 24% 이상 줄어들었으며, 특히 고도조건에서는 30% 가까이 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서 18 km의 고고도 환경에서 안정적인 운용을 위해 포트 슈라우드의 사용이 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 주요 사업의 일환으로 수행되는 '무인기 수소왕복엔진 기술개발' 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- (1) Lim, B. J. and Rhee, D. H., 2015, "Research and Development Trends of High Altitude Long Endurance UAV using Hydrogen Reciprocating Engine," *Current Industrial and Technologic Trends in Aerospace*, Vol. 13, No. 2, pp. 179~186.
- (2) Kang, Y. S., Lim, B. J., and Kim, J. K., 2015, "Establishment of Multi-stage Turbocharger Layout for HALE UAV Engine and Its Performance Assessment," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 18, No. 6, pp. 31~36.
- (3) Babák, M. and Palát, Z., 2010, "Design Optimization and Test of Advanced Small Scale Compressor," *European Workshop on New Aero Engine Concepts*, Munich, 30 June - 1 July 2010.
- (4) Gao, P., Zhang, Y., and Zhang, S., 2010, "Numerical Investigation of the Different Casing Treatment in a Centrifugal Compressor," In *Wearable Computing Systems (APWCS)*, 2010 Asia-Pacific Conference on (pp. 51-54). IEEE.
- (5) Kim, H. W., Chung, J. H., Ryu, S. H., and Lee, G. S., 2015, "Numerical and Experimental Study on the Surge Performance Improvement by the Bleed Slot Casing of a Centrifugal Compressor," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 18, No. 2, pp. 22~28.
- (6) Park, C. Y., Choi, Y. S., Lee, K. Y., and Yoon, J. Y., 2012, "Numerical Study on the Range Enhancement of a Centrifugal Compressor with a Ring Groove System," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1371~1378.
- (7) Zheng, X., Zhang, Y., Yang, M., Bamba, T., and Tamaki, H., 2013, "Stability Improvement of High-Pressure-Ratio Turbocharger Centrifugal Compressor by Asymmetrical Flow Control—Part II: Nonaxisymmetrical Self-Recirculation Casing Treatment," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 135, No. 2, pp. 021007-1~8.
- (8) Garrett Catalog Volume 5, Garrett by Honeywell.