

리니어 압축기에서 예압축을 위한 체크 밸브 피스톤 성능 연구

김동규¹, 이영림^{2*}

¹공주대학교 기계자동차공학부 기계설계공학전공, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Study of Check Valve Piston Performance for pre-compression in Linear Compressors

Dong Gyu Kim¹, Young Lim Lee^{2*}

¹Major in Mechanical Design Engineering, Division of Mechanical and Automotive Engineering,
Kongju National University

²Professor, Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요약 에너지 소모가 증가함에 따라 가정에서 많은 에너지를 소모하는 냉장고의 효율을 개선할 필요가 있다. 그 중에서도 대부분의 전력을 소모하는 압축기의 성능을 향상시키는 것은 중요하다. 본 연구에서는 리니어 압축기 성능 향상을 위한 예압축을 활용하고자 체크 밸브 피스톤을 이용하였다. 이는 진동 노즐 대비 체크 밸브 피스톤은 압축기의 폐진동 에너지가 작을 때도 사용 가능하다고 사료되기 때문이다. 같은 압축 효과를 얻기 위해 진동 노즐 대비 체크 밸브 피스톤의 소요 동력이 얼마나 감소하는지 수치해석을 통하여 알아보았다. 행정과 회전수를 변화시키며 체크 밸브 피스톤의 예압축 효과를 알아보았고 특히 진동 노즐 대비 체크 밸브 피스톤의 소요 동력이 얼마나 감소하는지 알아보았다. 그 결과 행정과 회전수가 늘어날수록 예압축 효과와 소모동력이 커지며, 동일한 행정 혹은 회전수에서 진동 노즐보다 훨씬 높은 예압축 효과를 보여 주었다. 또한 진동 노즐의 예압축 효과를 얻기 위한 체크 밸브 피스톤 시스템의 소요 동력을 비교한 결과, 체크 밸브 피스톤을 활용한 예압축 시스템의 소모동력이 진동 노즐을 활용한 시스템보다 소모동력이 최대 25배 적었다. 따라서 압축기의 폐진동 에너지가 적은 시스템에서는 진동 노즐 대신 체크 밸브 피스톤을 활용하는 것이 더 적합하다.

Abstract In this study, a check-valve piston was employed to implement a precompression system and enhance the performance of a linear compressor. This choice was based on the assumption that the check-valve piston could be utilized rather than vibrating nozzles when the waste vibration energy of the compressor is minimal. Numerical analyses were conducted to determine the power reduction achieved by using a check-valve piston compared to vibrating nozzles while achieving the same compression effect. The precompression effect of the check-valve piston was investigated by varying the stroke and the number of revolutions. The aim was to determine the extent of power reduction achievable with the check-valve piston system compared to vibrating nozzles. The results indicated that as the stroke and the number of revolutions increased, both the precompression effect and the power consumption also increased. Furthermore, the precompression effect achieved with the check-valve piston system exceeded that of the vibrating nozzle system with the equivalent stroke and number of revolutions. The precompression system utilizing the check-valve piston consumed up to 25 times less power than the vibrating nozzle system. Hence, in systems with low waste vibration energy from the compressor, a check-valve piston is more suitable than a vibrating nozzle.

Keywords : CFD, Linear Compressor, Pre-compression, Refrigeration Cycle, Check Valve Piston

본 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.NRF-2016R1D1A1B02009582)의 연구과제임.

*Corresponding Author : Young Lim Lee(Kongju National Univ.)

email: ylee@kongju.ac.kr

Received July 6, 2023

Revised August 16, 2023

Accepted September 1, 2023

Published September 30, 2023

1. 서론

최근 들어 계속되는 에너지 소비량 증가에 따라 에너지 소비를 줄이기 위해 에너지 효율 개선이 중요하다. 에너지 효율 개선은 전력 소비 감소뿐만 아니라 온실가스 배출량 저감에도 중요하다. 냉장고는 가정 전력 소비량의 약 20~30%를 차지하고 있으며, 이는 에너지 효율 개선이 큰 영향을 미칠 수 있는 분야 중 하나이다. 냉장고의 핵심부품인 압축기는 냉장고 전력 소비량의 60~80%를 차지하고 있다[1]. 따라서, 냉장고의 전력소비량을 줄이기 위해서는 압축기의 효율을 높이는 것이 필수적이다.

냉장고에 주로 쓰이는 압축기는 왕복동식 압축기로, 모터의 회전운동을 크랭크축을 통해 직선 왕복 운동으로 바꾸는데, 이는 마찰로 인한 에너지 손실이 크고 소음이 발생한다. 반면에 리니어 압축기는 고자력의 자석을 이용한 리니어 모터가 사용되어 마찰로 인한 에너지 손실이 적고 흡입밸브와 토출밸브가 같은 방향으로 배열되어 있어 유동저항이 작아 왕복동식 압축기에 비해 많은 이점을 가진다.

지금까지 리니어 압축기의 성능을 향상시키고자 다양한 연구가 진행되어 왔는데, Binneberg 등[2]은 압축기에 인버터를 적용하여 에너지 소모량을 감소시키는 연구를 했고, Hwang 등[3]은 피스톤 간극을 통한 냉매 누출 최소화를 위한 이상유동 해석 및 실험을 통해 압축기 효율 최적화를 이루고자 하였다. Park 등[4]은 압축기 성능을 향상시키기 위해 밸브에 강제 모델을 적용하여 리니어 압축기의 흡입계를 최적화하였다. 또한, Ahn 등[5]은 터보 차징 시스템이 리니어 압축기의 성능을 향상시킬수 있다는 점에 착안하여 유체 다이오드를 통한 COP 향상을 위한 연구도 수행하였다[6].

이와 같이 리니어 압축기의 성능 향상을 위한 다양한 연구가 수행되었지만, 최근에 인버터 타입 왕복동식 압축기의 등장으로 리니어 압축기와의 효율 격차가 대폭 줄어든 실정이다. 따라서, 추가적인 압축기 효율 향상 연구를 통해 리니어 압축기의 성능을 더욱 개선시킬 필요가 있다.

최근에는 리니어 압축기의 성능을 더 향상하기 위해 예압축을 활용한 연구가 이뤄지고 있는데, Lee[7]는 압축기 흡입 시스템 내부에 한 쌍의 진동 노즐을 설치하여 압축기의 EER을 증가시키는 연구를 진행하였고, Park 등[8]은 예압축 시에 사용되는 진동 노즐의 형상 최적화를 위한 해석적 연구를 진행하였다.

체크 밸브를 피스톤 윗면에 장착한 체크 밸브 피스톤

은 진동 노즐 대비하여 개폐 시기를 제어해야 하는 단점은 있으나 예압축 효과는 월등히 우수할 것으로 사료된다. 이때 체크 밸브 피스톤은 압축 혹은 팽창과정에 따라 개폐되고 피스톤 운동은 압축기 바디의 진동에서 발생하는 폐에너지를 이용한다. 체크 밸브 피스톤을 이용한 예압축 시스템의 개략도를 Fig. 1 및 2에 나타냈다. 체크 밸브 피스톤은 리니어 압축기 흡입계에 장착하고 이를 진동하는 바디에 직결하면 구현 가능하다.

예압축 시스템을 리니어 압축기 흡입계에 장착하여도 냉동 사이클은 전형적인 냉동 사이클을 보여준다. 이러한 추가적인 압축으로 인해 냉매 유량이 증가하고 이는 냉동 사이클의 성능을 개선시킬 수 있다[7].

본 연구에서는 이러한 체크 밸브 피스톤을 이용하여 예압축을 통한 압축기 성능을 향상하고자 하였다. 이를 위해 체크 밸브 피스톤의 작동 주파수와 행정을 변화시키며 예압축 효과를 알아보고 같은 조건에서 진동 노즐 대비 예압축 효율이 얼마나 개선되는지 비교하였다.

2. 수치해석 방법

본 수치해석에서 고려된 유체 유동은 3차원, 압축성, 비정상상태, 난류유동으로 난류모델은 Menter[9]가 제시한 SST $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. 체크 밸브 피스

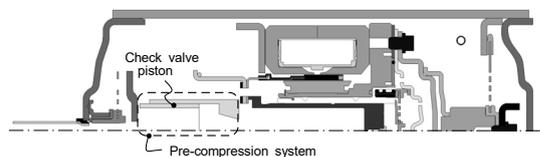


Fig. 1. Schematic of a check valve piston attached to a linear compressor

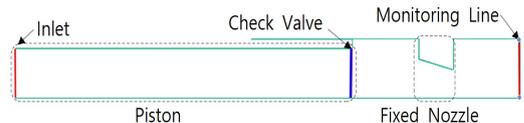


Fig. 2. Schematic of the check valve piston

톤이 움직이는 과정을 묘사하기 위해 Fluent[10]에 동격자(dynamic mesh)의 레이어링 기법(layering method)을 사용하였다. 지배방정식은 Eq. (1) 과 같은 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (1)$$

where ρ denotes density, \bar{u} velocity vector and μ dynamic viscosity.

Fig. 3은 체크 밸브 피스톤 유동해석을 위한 격자 시스템을 보여준다. 본 연구에서 고려한 유동은 3차원, 비정상상태, 압축성, 난류 유동으로 많은 해석 시간이 요구된다. 따라서 수치해석 시간을 최소화하기 위하여 3차원 모델 대신 2차원 축대칭 모델을 채택하였다. 또한, 격자는 사각형 및 삼각형 격자로 구성되어있다. 이때 사각형 격자는 동격자의 레이아웃 기법이 필요한 곳에 사용했다.

본 연구에서는 상용 프로그램인 Fluent[10]를 사용하여 수치해석 하였고, 경계조건으로 Inlet은 대기압, 유체는 공기로 가정하였다. 또한 본 연구에서 고려한 압축기 회전속도는 2000 ~ 6000rpm이고 행정(stroke)은 2.5 ~ 10mm이다.

체크 밸브 피스톤의 예압축 효과 및 소요 동력은 피스톤 주파수와 행정을 변화시키며 알아보았고, 동일 조건 일 때의 진동 노즐과 비교하였다. 이를 통해 체크 밸브 피스톤을 이용한 예압축의 효율성을 알아보았다.

체크 밸브의 개방 타이밍은 최고의 압축 효과를 위해 피스톤이 상사점에 도달할 때로 설정하여 수치해석하였다. 또한, 체크 밸브의 개방 이후 압축실 내부의 공기가 완전히 대기압 상태로 돌아오지 않은 채로 다시 압축되면 압력이 계속 증가하게 되므로 누설을 고려한 모델을 사용하였다. 즉 체크 밸브가 개방되고 하사점에서 다시 체크 밸브가 닫힐 때까지 간극을 통해 압력이 빠져나가 대기압이 되게 하였다. 누설을 고려한 모델을 사용하게 되면 실제 예압축 시스템과 유사한 구조를 얻을 수 있다 [9].

수치해석의 격자 의존성 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이때 최대압력 변화율은 셀 개수 약 2만 개일 때를 기준으로 하였다. 그 결과 셀 개수가 약 1만 개를 사용하면 변화율이 1% 미만으로 나타나 본 연구에서는 약 1만 개의 격자를 사용하였다. 한편 본 수치해석 결과의 검증은 저자들의 진동 노즐을 이용한 예압축 연구[8]에서 이미 실험과의 비교를 통해 검증되었다. 향후 연구에서 체크 밸브 피스톤을 사용하여 실험과의 비교 검증 역시 수행될 예정이다.



Fig. 3. Mesh system of an axi-symmetric model for the check valve piston

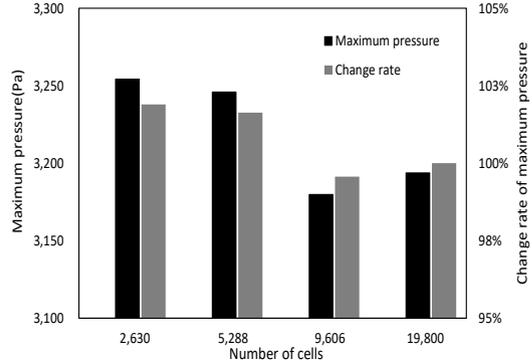


Fig. 4. Variation of maximum pressure and its change rate with number of cells

3. 결과 및 고찰

3.1 행정에 따른 압축실 압력 및 피스톤 소요 동력 변화

Fig. 5에 행정에 따른 압축실의 최대압력과 소요 동력 변화를 나타내었다. 이때 회전수는 2000 rpm이다. 압축

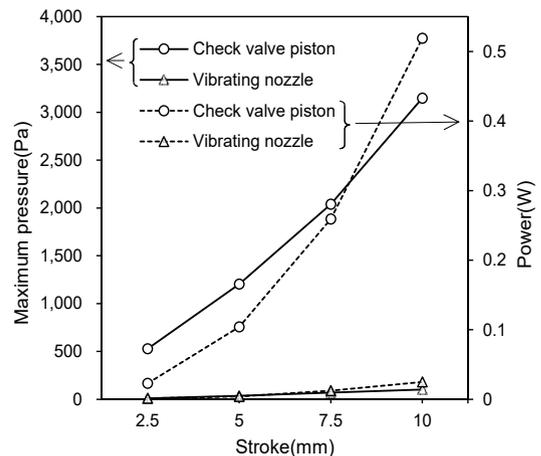


Fig. 5. Variation of the maximum pressure in a compression chamber and power consumption with stroke for a check valve piston and vibrating nozzle systems

실 최대압력은 대략 행정의 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이는 압력이 속도의 제곱에 비례하여 증가하는데 행정이 길어지면 피스톤 속도가 선형적으로 증가하기 때문이다. 행정이 10mm일 때 최대압력은 약 3150Pa 까지 도달하여 유사 조건에서의 진동 노즐의 최대압력 약 100Pa보다 예압축 효과가 월등히 뛰어남을 알 수 있다[8]. 한편, 행정이 길어질수록 소모동력 또한 증가하는데 행정이 10mm일 때 소모동력은 약 0.5W이다. 마찰을 고려하지 않은 소모동력이라 실제 소모동력은 이보다 클 것으로 예상되나 그 값은 제한적이라 사료된다[11]. 체크밸브 피스톤의 경우 진동 노즐에 비해 소모동력은 약 20배 늘어나는 대신 최대압력은 약 30배 이상 증가하여 예압축 시스템으로서 더 효율적이다.

3.2 회전수에 따른 압축실 압력 및 피스톤 소요 동력 변화

Fig. 6에 회전수에 따른 압축실의 최대압력과 소요 동력 변화를 나타내었다. 이때 행정은 2.5 mm이다. 압축실 최대압력은 비교적 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 회전수가 6000rpm일 때 최대압력은 약 1900Pa 까지 도달하여 유사 조건에서의 진동 노즐 최대압력 약 80Pa 보다 예압축 효과가 월등히 뛰어남을 알 수 있다[8]. 한편, 회전수가 늘어날수록 소모동력 또한 증가하는데 회전수가 6000rpm일 때 소모동력은 약 0.25W이다. 체크 밸브 피스톤의 경우 진동 노즐에 비해 소모동력은 약 20배 늘어나는 대신 최대압력은 약 25배 이상 증가하여 예압축 효과가 더 우수함을 알 수 있다.

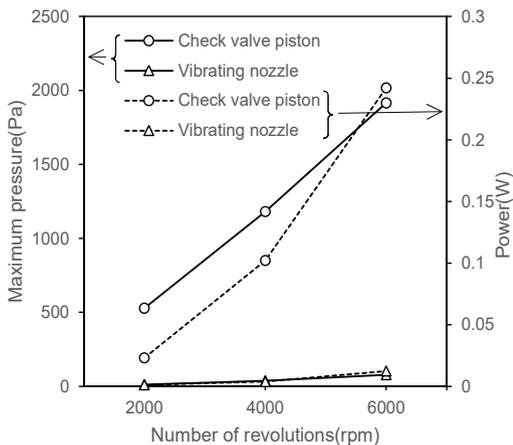


Fig. 6. Variation of the maximum pressure and power consumption in a compression chamber with number of revolutions for a check valve piston and vibrating nozzle systems

3.3 작동 조건에 따른 체크 밸브 피스톤과 진동 노즐 소모동력 비교

Fig. 7~10에서 진동 노즐 행정에 따른 최대압력과 동일한 크기의 최대압력을 발생시키는 체크 밸브 피스톤의 행정을 구한 다음 그때 소요되는 동력을 각각 비교하였다. 이때 최대압력을 기준으로 사용한 이유는 압축기 흡입밸브의 양정이 최대압력에 비례하기 때문이다.

Fig. 7에 진동 노즐과 체크 밸브 피스톤의 소요 동력을 비교하였다. 이때, 동일 최대압력을 발생시키기 위해서 진동 노즐 행정은 10mm, 체크 밸브 피스톤의 행정은 1.2mm이다. 소요 동력은 진동 노즐이 0.5W이고 체크 밸브 피스톤은 0.05W이다. 이는 체크 밸브 피스톤이 약 1/10의 소요 동력을 가지고 동일 압력을 발생시킬 수 있음을 의미한다. 따라서, 사용하고자 하는 바디의 폐진동 에너지가 작은 경우, 체크 밸브 피스톤이 고려되어야 한다.

Fig. 8~10에 진동 노즐 행정이 7.5, 5, 2.5mm일 때의 소요 동력 비교를 나타냈다. 행정이 7.5mm일 때 진동 노즐과 체크 밸브 피스톤의 소요 동력은 각각 1/11이고, 5mm일 때 1/14, 2.5mm일 때 1/24이다. 이는 진동 노즐 행정이 감소할수록 동일 최대압력을 내기 위한 체크 밸브 피스톤의 소요 동력은 더욱더 낮아짐을 의미한다.

Fig. 11~13에서 진동 노즐 회전수가 6000rpm, 4000rpm, 2000rpm일 때 각각의 최대압력과 동일한 크기의 최대압력을 발생시키는 체크 밸브 피스톤의 회전수를 구한 다음 그때 소요되는 동력을 각각 비교하였다. 회전수가 2000rpm일 때 진동 노즐과 체크 밸브 피스톤 소요 동력은 각각 0.2W와 0.0008W로 이때 비율은 1/25이고, 4000rpm일 때 1/16, 6000rpm일 때 1/11이다. 이는 진동 노즐 회전수가 감소할수록 동일 최대압력을 내기 위한 체크 밸브 피스톤의 소요 동력은 더욱더 낮아짐을 의미한다.

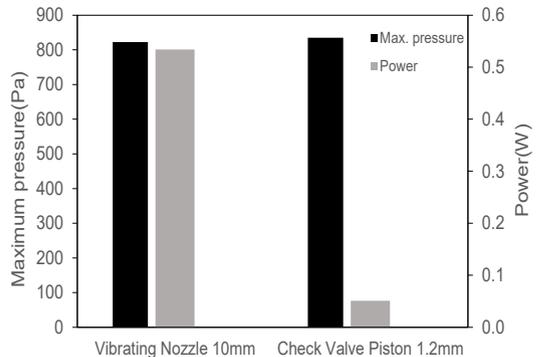


Fig. 7. Power consumption of a 10 mm-stroke vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

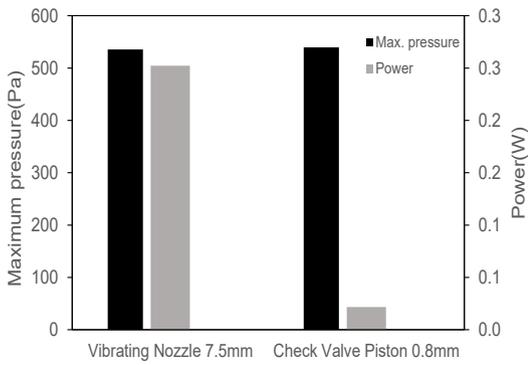


Fig. 8. Power consumption of a 7.5 mm-stroke vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

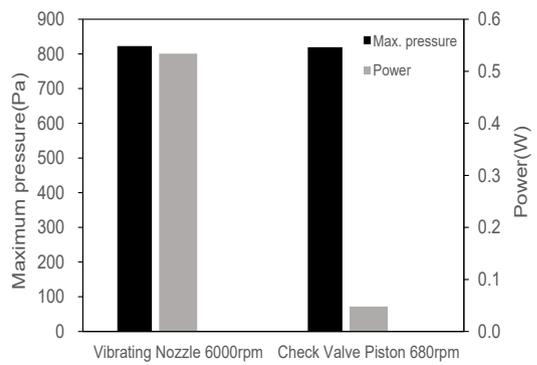


Fig. 11. Power consumption of a 6000rpm vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

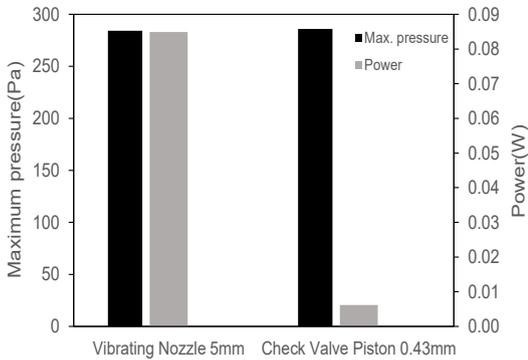


Fig. 9. Power consumption of a 5 mm-stroke vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

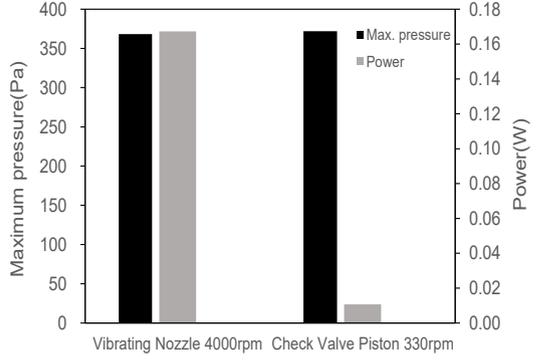


Fig. 12. Power consumption of a 4000rpm vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

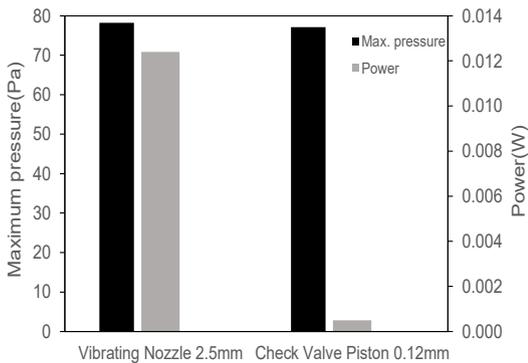


Fig. 10. Power consumption of a 2.5 mm-stroke vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

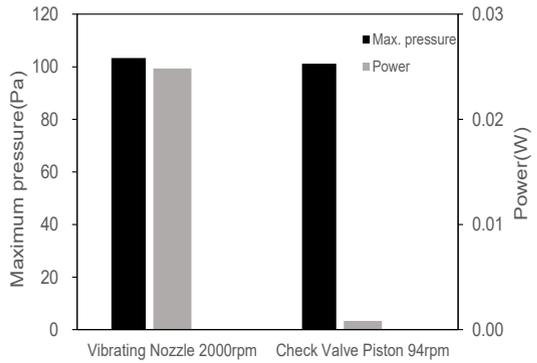


Fig. 13. Power consumption of a 2000rpm vibrating nozzle and a check valve piston with the same maximum pressure

4. 결론

본 연구에서는 사용할 폐진동 에너지가 작은 경우 사용 가능한 체크 밸브 피스톤 예압축 시스템을 고려하였다. 이를 통해 진동 노즐이 발생시키는 압력을 재현할 수 있는 체크 밸브 피스톤의 소요 동력을 진동 노즐 소요 동력과 비교하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 체크 밸브 피스톤은 행정이 증가할수록 최대압력이 증가하는데 동일 조건에서 진동 노즐보다 최대 30배 이상 예압축 효과가 우수하다.
- (2) 체크 밸브 피스톤은 회전수가 증가할수록 최대압력이 증가하는데 동일 조건에서 진동 노즐보다 최대 25배 이상 예압축 효과가 우수하다.
- (3) 진동 노즐에 비해 체크 밸브 피스톤은 최대 25배 적은 동력을 소모하므로 체크 밸브 피스톤을 통한 예압축은 진동 노즐에 비해 훨씬 높은 에너지 소비 효율을 가진다.

References

- [1] H. K. Lee, G. Y. Song, J. S. Park, E. P. Hong and W. H. Jung, "Development of the Linear Compressor for a Household Refrigerator", International Compressor Engineering Conference, Purdue University, pp. 31~38, 2000.
- [2] H. Lee, S. H. Kim, S. S. Jung and W. H. Rhee, "The Innovative Green Technology for Refrigerators Development of Innovative Linear Compressor", International Compressor Engineering Conference, Purdue University, 2008.
- [3] I.S. Hwang, W. Oh, K. Park et al. "A study on two phase flows of linear compressors for the prediction of refrigerant leakage". *J Mech Sci Technol* 29, 4737-4743 (2015).
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1021-1>
- [4] S.J. Park, I.S. Hwang, W.S. Oh et al. "A study on cycle performance variation of a linear compressor considering valve behavior". *J Mech Sci Technol* 31, 4481-4488 (2017).
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0848-z>
- [5] I.Y. An, Y.L. Lee. "CFD Analysis on Efficiency Improvement of a Linear Compressor using Turbocharging." *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, vol. 17, no. 1 pp.63-68, 2015
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.17.1.201502.63>
- [6] I.Y. An. "Study on the Efficiency Improvement of a Linear Compressor with Fluid Diode" Graduate School

of Kongju National University, Master's Thesis, pp. 49.

- [7] Y.L. Lee., "Numerical Analysis of Effect of Vibrating Nozzles on the EER of a Refrigerant Compressor," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, vol. 25, no.2, pp.170-175, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.25.2.202304.170>
- [8] J.K. Park, Y.L. Lee. "A Study on the Feasibility of Pre-compression in linear Compressors Using Vibrating Nozzle." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*; vol. 24, no. 5, pp. 654-659, May 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.5.654>
- [9] Menter, Florian R. "Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows.", NASA Technical Reports, No. A-92183. 1992.
- [10] Ansys Fluent V18, Ansys Inc, 2018.
- [11] X. Zhang, D. Ziviani, J.E Braun, E.A Groll. "Numerical analysis of gas bearings in oil-free linear compressors. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers," Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022 236(1):79-86.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408920943814>

김 동 규(Dong Gyu Kim)

[준회원]



• 2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 (학부생)

<관심분야>

리니어 압축기, 열유체공학, CFD

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



• 1988년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
• 1995년 2월 : The University of Texas at Austin 대학원 기계공학 (공학박사)
• 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

리니어 압축기, 히트펌프, 냉동공학