

진동 노즐을 이용한 리니어 압축기의 예압축 타당성 연구

박진규¹, 이영림^{2*}

¹공주대학교 기계자동차공학부 기계설계공학전공, ²공주대학교 기계자동차공학부

A Study on the Feasibility of Pre-compression in linear Compressors Using Vibrating Nozzle

Jin Kyu Park¹, 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 냉장고에서 압축기는 전력 소비의 60~80%를 차지하기 때문에 압축기 효율을 개선하는 것이 에너지 소비 저감을 위해서 중요하다. 본 연구에서는 리니어 압축기의 효율을 더욱 개선하기 위하여 진동 노즐을 활용한 예압축 시스템의 타당성을 알아보고자 하였다. 이를 위해 진동 노즐의 노즐 형상, 작동 주파수 및 누설이 압축 성능에 미치는 영향을 수치 해석하였다. 그 결과 왼쪽 진동 노즐 각도가 커질수록 예압축 효과가 증가하였고, 오른쪽 정지 노즐은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 노즐 프로파일이 직선, 오목, 볼록, 격벽인 모델을 비교해 보았을 때 직선 형상과 오목 형상이 상대적으로 예압축 효과가 크다. 또한, 작동주파수가 증가하면 예압축 효과도 높아졌다. 수치 모델을 검증하기 위해 해석 결과를 실험 결과와 비교한 결과, 동일한 누설을 허용했을 때 예압축 효과가 일치하는 경향을 보였다. 진동 노즐을 통한 예압축 효과는 흡입 밸브의 개방 시간을 증가시켜 압축실 내로의 냉매 유입을 증가시켜 압축기 성능을 향상시킬 것으로 예상된다. 따라서, 향후 예압축에 따른 인한 밸브 거동에 대한 추가적인 연구를 통해 압축기 성능 향상 확인이 필요하다.

Abstract This study investigates the feasibility of a pre-compression system using a vibrating nozzle to improve the efficiency of a linear compressor. For this purpose, the effects of nozzle geometry, operating frequency, and leakage of the vibrating nozzle on the compression performance were numerically analyzed. The results show that the pre-compression effect increased as the angle of the left vibrating nozzle increased, and the right stationary nozzle did not have a significant effect. When comparing models with straight, concave, convex, and partition-wall nozzle profiles, the straight and concave profiles had relatively large pre-compression effects. The pre-compression effect increased with increasing operating frequency. To validate the numerical model, the numerical results were compared with experimental results, and the pre-compression effect tended to be consistent when proper leakage was allowed. The pre-compression effect of the vibrating nozzle is expected to increase the opening time of the suction valve, which increases the refrigerant inflow into the compression chamber and thus improves the compressor performance. Therefore, it is necessary to further study the valve behavior due to pre-compression in the future to confirm the improvement of compressor performance.

Keywords : CFD, Linear Compressor, Pre-compression, Refrigeration Cycle, Vibrating Nozzle

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 March 21, 2023

Accepted May 12, 2023

Revised April 10, 2023

Published May 31, 2023

1. 서론

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

냉동기용 압축기에 주로 쓰이는 왕복동 압축기는 냉동 시스템을 포함한 다양한 분야에서 널리 사용되어 왔다. 하지만 왕복동 압축기는 모터의 회전운동을 피스톤의 왕복운동으로 바꾸는 과정에서 다수의 마찰점으로 인한 에너지 손실, 소음 등의 단점이 있다. 이와 대조적으로, 본 연구에서 고려한 리니어 압축기는 고자력 자석을 사용한 리니어 모터로 구동되기 때문에 크랭크 구조를 가지고 있지 않아 하나의 마찰점을 갖고 있어 에너지 손실이 적고 소음이 감소하는 등 왕복동 압축기에 비해 이점을 가지고 있다[2]. 따라서, 리니어 압축기는 냉장고뿐만 아니라 다양한 분야에 그 사용성을 넓혀 나가고 있다.

이러한 리니어 압축기는 많은 연구들이 진행되고 있는데 Kim 등[3]은 리니어 압축기의 동적 특성을 수치해석과 실험을 통해 압축기 효율 향상을 위한 연구를 하였다. 또한, Hwang 등[4]은 비정상 유동의 특성을 고려한 리니어 압축기의 수치해석 모델을 제시하였고 이를 실험을 통하여 검증하여 수치모델의 예측 정확도를 높였다. 또한, 그들은 압축기 바디 진동을 통한 셀 내부유동을 고려해 과열도를 보다 정확하게 예측할 수 있는 수치해석 모델을 제시하였다. 한편, Park 등[5]은 밸브 강체 모델을 이용하여 리니어 압축기 흡입계의 최적화를 통해 압축기 성능을 향상시켰다. Chun 등[6]은 리니어 압축기 효율을 향상시키기 위하여 PWM(pulse width modulation) 인버터로 구동되는 리니어 압축기에 관한 연구를 수행하였다. Koh[7] 등은 극저온용 스티어링 리니어 압축기의 특성에 관한 연구를 수행하였다.

이와 같이 리니어 압축기의 효율과 성능은 많이 개선되었으나, 최근 들어 인버터 타입 왕복동 압축기의 등장으로 효율 격차가 많이 감소되었다. 따라서, 리니어 압축기의 효율을 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 리니어 압축기 효율 향상을 위해 예압

축을 고려하였고 이를 위해 두 개의 진동 노즐을 고려하였다. 이때 진동 노즐은 압축기 바디에서 손실되는 진동 에너지를 이용하여 구동된다. Fig. 1에 진동 노즐의 개략도를 나타냈다.

자세한 진동 노즐 구조는 다른 논문에 잘 서술되어 있다[8]. 진동 노즐은 노즐의 방향에 따라 유동 저항이 다른 점을 이용하여 밸브없이 압축 효과를 얻고자 할 때 사용하는 한 쌍의 노즐을 의미한다. 이 때 진동 노즐은 원형 실린더에 노즐을 중앙에 가공하여 만든다. 왼쪽 노즐이 진동하며 압축하고 오른쪽 진동 노즐은 고정되어 있다. 이때 다양한 종류의 진동노즐 예압축 효과를 확인하기 위해 CFD를 활용하였다.

2. 수치해석 방법

본 수치해석에서 고려된 유체유동은 3차원, 압축성, 비정상상태 난류유동으로 난류모델은 Menter[9]가 제시한 SST $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. 진동노즐이 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. 2는 진동노즐 유동해석을 위한 격자 시스템을 보여준다. 본 수치해석에서 고려한 유동은 해석시간이 많이 요구되는 3차원, 비정상상태, 압축성, 난류유동이기 때문에 격자 수를 최소화할 수 있는 축대칭 모델로 가정하여 해석시간을 줄였다.

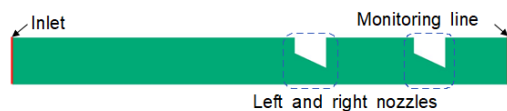


Fig. 1. Schematic of vibrating nozzles



Fig. 2. Mesh system of an axis-symmetric model for the vibrating nozzles

또한, 격자는 사각형 및 삼각형 격자로 구성되어있다. 이때 사각형 격자는 동격자의 레이어링 기법이 필요한 곳에 사용했다.

본 수치해석에서는 상용 프로그램인 Fluent를 사용하였고, 경계조건으로 Inlet은 대기압, 노즐 스트로크로는 15 mm, 물성치는 공기의 이상기체상태방정식을 사용하였다. 또한 본 연구에서 고려한 리니어 압축기의 회전속도는 700~1300rpm이다.

본 연구에서는 진동 노즐의 각도, 주파수, 형상에 따른 예압축 효과를 수치해석적으로 알아보았다. 이를 통해 최적의 진동노즐 형상 및 작동 조건을 결정하였다. 또한 수치해석 모델의 검증을 위해 실험 결과와의 비교도 수행하였다.

Fig. 3에는 진동노즐의 제원을 나타내었다. 이때 왼쪽 노즐의 각도는 θ_1 오른쪽 노즐의 각도는 θ_2 이다. Table 1은 모델 1, 2, 3, 4, 5의 진동노즐 각도를 보여준다. Fig. 4는 진동노즐 프로파일(profile)이 볼록한 노즐과 오목한 노즐의 개략도를 나타낸다. 이때 왼쪽 노즐과 오른쪽 노즐의 각도는 25°이다. 이는 기준 모델인 15° 모델이 압축 효과가 크지 않아 압축효과가 비교적 큰 25° 모델을 고려하였다.

Fig. 5에는 모델 6, 7, 8의 직경에 대한 제원을 나타냈다. 모델 6, 7, 8은 격벽(partition)을 사용해 노즐 직경을 줄인 모델이다. 이는 Jeon[7]등에서 사용한 모델로 수치해석 결과를 검증하기 위해 채택하였다. 실험 결과를 근사시키기 위해 이 모델들은 누설을 허용하였다. Fig. 6은 누설이 적용된 모델의 개략도를 보여 준다.

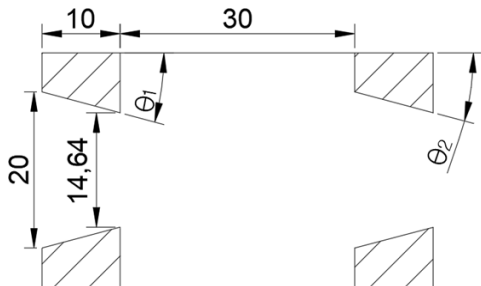


Fig. 3. Dimension of vibrating nozzles(unit:mm)

Table 1. Specifications of the nozzle angles with model

Model	Specification (Left nozzle angle-Right nozzle angle)
Model 1	10°-15°
Model 2	15°-15°
Model 3	20°-15°
Model 4	25°-15°
Model 5	30°-15°

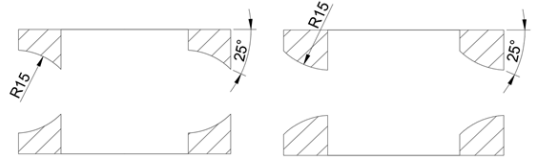


Fig. 4. Dimension of vibrating nozzles with curved profile (a)Concave (b)Convex

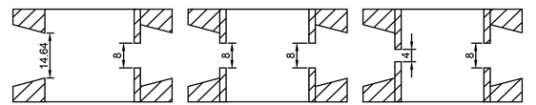


Fig. 5. Dimension of a vibrating nozzles with partition (unit:mm) (a) Model 6 (b) Model 7 (c) Model 8

Table 2. Summary for the models

Model	Specification (Left nozzle diameter - Right nozzle diameter)
Model 6	14.64 mm - 8 mm
Model 4	8 mm - 8 mm
Model 5	4 mm - 8mm

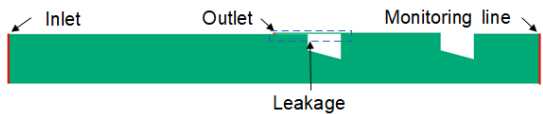


Fig. 6. Schematic of vibrating nozzles with leakage

3. 결과 및 고찰

3.1 진동 노즐 프로파일에 따른 압축실 압력 변화

Fig. 7에 한 주기 동안 노즐 프로파일에 따른 압축실의 평균압력 변화를 나타냈다. 이때 회전수는 1000 rpm, 노즐 행정은 약 15.6 mm이다. 노즐 프로파일이

직선인 경우가 다른 3가지 모델에 비해 가장 높은 압력인 약 13.2 Pa를 보여주고 있다. 한 사이클 동안 압축실의 최대압력 및 최소압력 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 최대압력은 직선 형상 노즐에서 약 60 Pa로 가장 크고 볼록 형상 노즐에서 약 37 Pa 정도로 가장 작다. 최소압력은 최대압력 대비 모델에 따라 압력변화가 상대적으로 작았고 가장 작은 최소압력은 격벽 형상 노즐로 약 -25 Pa이고 가장 큰 최소압력은 직선 형상 노즐로 약 -19 Pa이다. 사이클 평균압력은 오목 형상 노즐이 가장 크지만 직선 형상 노즐의 평균압력이 오목 형상 대비 약 3% 이내이고 부압도 더 작게 나타나 본 연구에서는 진동 노즐 프로파일로 직선 형상을 선택하였다.

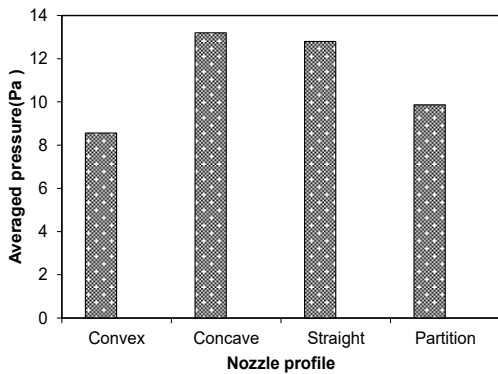


Fig. 7. Variation of averaged pressure in a compression chamber with nozzle profile

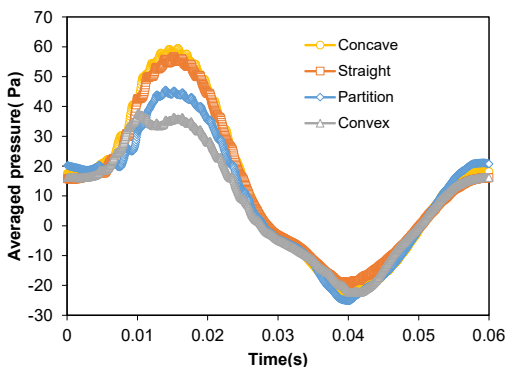


Fig. 8. Variation of pressure in a compression chamber with time for a cycle

3.2 진동 노즐 각도에 따른 압축실 압력 변화

Fig. 9는 한 주기 동안 노즐 각도(θ_1 , θ_2)에 따른 압축실 평균압력 변화를 보여준다. 이때 회전수는 1000

rpm, 노즐 행정은 약 15.6 mm이다. 노즐의 왼쪽 각도인 θ_1 이 커짐에 따라 압축실 평균압력도 비례해서 급격하게 증가한다. 이는 왼쪽 노즐의 직경이 작아질수록 압축 효과가 좋아짐을 의미한다. 하지만 각도가 커질수록 노즐 직경이 너무 작아져 흡입과정 중에 노즐을 통과하는 유체의 유동을 과도하게 제한할 가능성이 있으므로 본 연구에서는 30° 를 최대 각도로 고려하였다. 한편 오른쪽 노즐의 직경 θ_2 에 따른 평균압력 변화는 θ_1 에 비해 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 한 쌍의 진동 노즐을 이용하여 압축할 경우 실제로 진동하는 노즐의 직경 크기가 압축 효과에 지대한 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 본 연구에서 고려된 진동노즐로 인한 최대 평균압력은 θ_1 이 30° , θ_2 가 25° 일 때 발생하였고 그 크기는 약 35Pa이다.

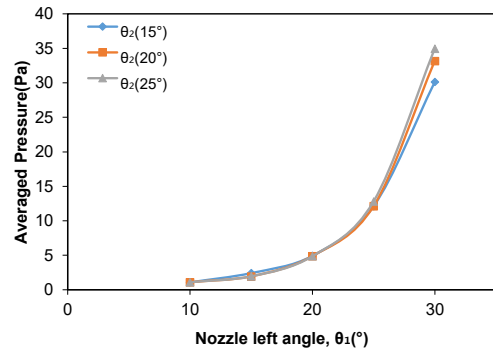


Fig. 9. Variation of averaged pressure in a compression chamber with nozzle angle

3.3 진동 노즐 주파수에 따른 압축실 압력 변화

Fig. 10에 모델에 따른 한 주기 동안의 압축실 평균압력 변화를 나타냈다. 이때 고려된 주파수는 700~1300 rpm이다. 왼쪽 노즐 각도 및 회전수가 증가할수록 평균압력은 증가하는데 노즐 각도에 따른 평균압력 증가율이 더 가파르다. 이는 공기 유입을 제한하지 않는 최소 노즐 직경이 공기 유입에 효과적이라는 것을 의미한다. 최대압력은 모델 5가 1300 rpm으로 작동할 때 발생하며 약 50 Pa이다.

한 사이클 동안 압축실의 최대압력 및 최소압력 변화를 Fig. 11에 나타냈다. 압축실 평균압력이 rpm에 따라 증가하는데 이에 따라 변동 폭도 커지게 된다. 따라서, 최대압력 및 최소압력은 1300 rpm에서 발생한다.

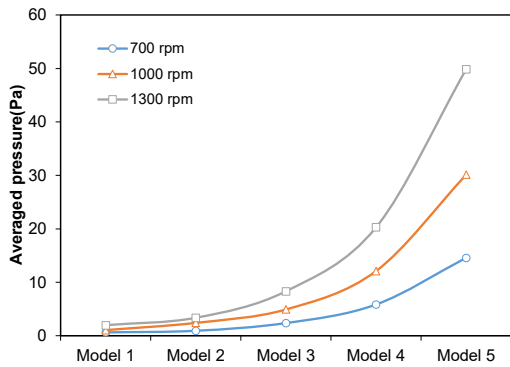


Fig. 10. Variation of cylinder pressure with cylinder volume for a cycle

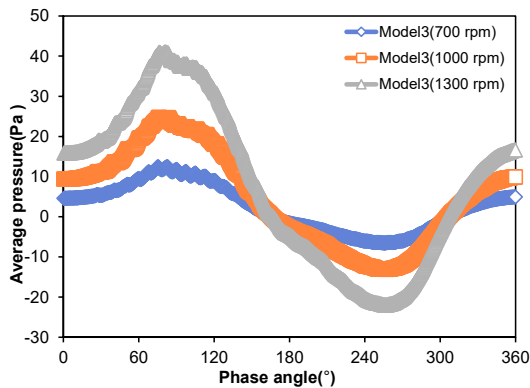


Fig. 11. Variation of cylinder pressure with cylinder volume for a cycle

3.4 진동노즐 간극 누설 효과

Fig. 12에서 모델에 따른 한 주기 동안 평균압력 변화를 실험과 비교하였다. 진동하는 노즐과 실린더 사이의 간격(clearance)이 300 μm일 때 수치해석 결과는 실험

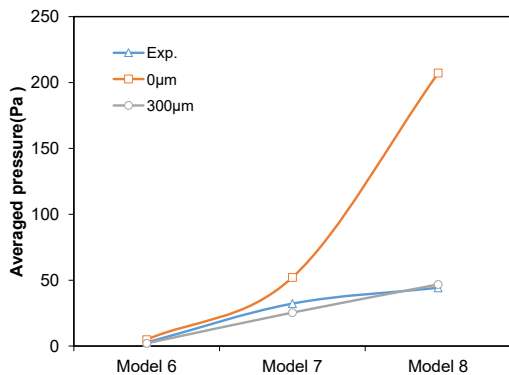


Fig. 12. Variation of mass flow rate at suction valve

과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 실험에서 간극을 더 줄인다면 더 높은 압력을 얻을 수 있음을 의미한다. 누설을 배제했을 때 얻을 수 있는 최대 압력은 수치해석적으로 예측한 결과 약 200 Pa 이상이다. 따라서, 간극 또한 압축 효과를 증대시키기 위한 주요한 인자이다.

4. 결론

본 연구에서는 진동 노즐을 활용한 예압축 시스템이 리니어 압축기 성능 및 효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 진동 노즐의 예압축 성능을 수치해석을 통하여 알아보았다. 수치해석은 실험 결과와 비교 검증하였고

- (1) 진동 노즐 옆면은 오목(concave) 혹은 직선 형상이 최적이다. 가공의 수월성을 생각할 때 직선 프로파일이 권고된다.
- (2) 진동 노즐의 각도 및 주파수에 따라 압축실 평균압력은 증가하는데 각도에 따른 증가율이 더 높다. 따라서, 최대 노즐 각도가 예압축에 유리하다.
- (3) 본 연구에서 고려된 작동 주파수는 약 12~22 Hz로 진동 노즐에 의한 최대 평균압력은 약 60 Pa로써 예압축 효과가 확인되었다. 이는 실제 작동 주파수인 100 Hz에서는 더욱 높은 압축 효과를 보일 가능성이 높음을 의미한다.

향후, 진동 노즐 시스템을 제작하여 기존 리니어 압축기에 장착한 후 성능 검증이 필요하다.

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", Proceedings 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", Proceedings International Compressor Engineering Conference, Purdue University, 2008.
- [3] J. K. Kim, C. K. Roh, H. Kim and J. H. Jeong, "An Experimental and Numerical Study on an Inherent Capacity Modulated Linear Compressor for Home Refrigerators", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, pp. 1415~1423, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.04.011>
- [4] I. S. Hwang and Y. L. Lee, "CFD analysis of transient

flows in a linear compressor using a 1D-CFD coupled model", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 91, pp. 20~27, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2018.04.015>

- [5] S. J. Park, I. S. Hwang, W. Oh and Y. L. Lee, A study on cycle performance variation of a linear compressor considering valve behavior. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, pp. 4481-4488, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0848-z>
- [6] T. -W. Chun, J. -R. Ahn, H. -H. Lee, H. -G. Kim and E. -C. Nho, "A Novel Strategy of Efficiency Control for a Linear Compressor System Driven by a PWM Inverter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 296-301, Jan. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.909730>
- [7] D. Y. Koh, Y. J. Hong, S. J. Park, H. B. Kim, K. S. Lee. "A study on the linear compressor characteristics of the Stirling cryocooler" *Cryogenics* vol 42, Issues 6-7, 2002, Pages 427-432.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00064-4)
- [8] J. M. Jeon, Y. L. Lee, "A Study on the Feasibility of Pre-compression in linear Compressors Using Fluid Diode", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 55~60.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2023.22.03.055>
- [9] Menter, Florian R. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. No. A-92183. 1992.
- [10] Ansys Fluent V18, Ansys Inc, 2018.

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 기계공학부 교수

<관심분야>

열유체

박 진 규(Jin Kyu Park)

[준회원]



- 2019년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 공학부 (학부생)

<관심분야>

열유체