

리브를 활용한 압축기 냉각 효율 향상에 관한 연구

황일선*, 이영림**,#

*공주대학교 친환경지속가능에너지연구소, **공주대학교 기계자동차공학부

Improvement of Compressor-Cooling Efficiency Based on Ribs

Il Sun Hwang*, Young Lim Lee**,#

*Postdoctoral fellow, Sustainable Eco-friendly Energy Center, Kongju National University.,

**Dept. of Mech. and Auto. Eng., Kongju National University.

(Received 04 March 2021; received in revised form 15 April 2021; accepted 10 May 2021)

ABSTRACT

Recently, several efforts have been made to improve the thermal efficiency of a refrigerant compressor. In this study, we attempted to improve energy efficiency ratio (EER) performance by reducing the superheat of the linear compressor. To this end, heat generated inside the compressor must be effectively dissipated. Therefore, heat dissipation was improved by processing ribs in the gap-flow region generated owing to the vibration of the compressor body. The results showed that the convective heat transfer coefficient becomes significantly high when ribs are used, increasing the heat dissipation rate. This helps improve EER by reducing the superheat of the compressor.

Key Words : Linear Compressor(리니어 압축기), Compressor Superheat(압축기 과열도), Ribs(리브), Convective Heat Transfer Coefficient(대류열전달계수)

1. 서 론

냉장고는 생활에 필요한 필수 가전제품으로 자리 매김하고 있다. 각 가정은 1대 이상의 냉장고를 사용하고 있으며 가정용 냉장고를 통해 소비되는 에너지는 세계 전기소비량의 약 6.1%를 차지한다^[1]. 냉장고는 냉동사이클을 통해 냉장실과 냉동실을 낮은 온도로 유지해 주며 압축기-응축기-팽창밸브-증발기로 이루어져 있다. 이중 압축기는 냉장고의 여러 부품 중에서도 소비 전력이 가장 높아 냉장고의 소비 전력을 감소시키려면 압축기의 효율을 증가시키는 것이 중요하다^[2].

가정용 냉장고에는 주로 왕복동 압축기와 리니어 압축기가 사용되고 있다. 왕복동 압축기는 모터의 회전운동을 피스톤의 직선운동으로 변환시키기 때문에 에너지 손실이 일어난다. 그에 반해 리니어 압축기는 리니어 모터의 특성상 직선운동을 하므로 변환 손실이 발생하지 않아 왕복동 압축기보다 효율이 높았다. 하지만 인버터를 이용한 가변형 왕복동 압축기가 개발되면서 리니어 압축기와 왕복동 압축기 사이의 격차는 많이 감소하였다^[3]. 왕복동 압축기의 효율 향상을 위해 많은 연구가 이루어지고 있는 동안 리니어 압축기의 효율 향상을 위한 연구들도 많이 이루어지고 있다. Choi 등^[4]은 밸브 예압에 다른 밸브의 거동 특성을 FSI를 이용해 연구하였다. Hwang 등^[5]은 실험 및 FSI 수치해석모델을 사용해 토출밸브의 거동을 성공적으로 예측하였

Corresponding Author : ylee@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-521-9261, Fax: +82-41-555-9123

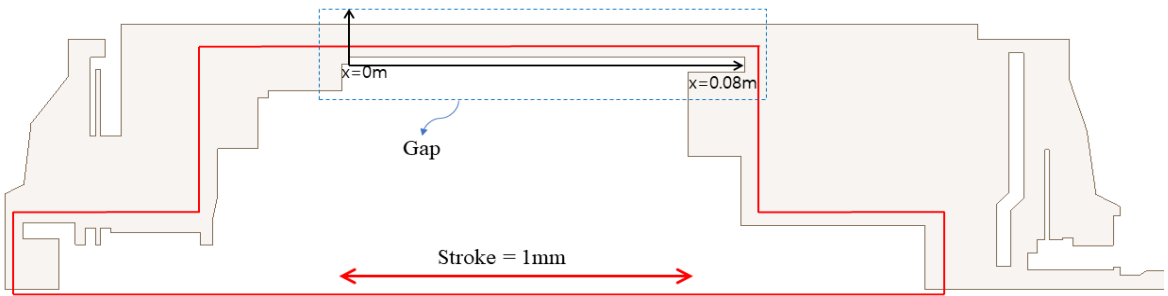


Fig. 1 Schematic of the numerical model

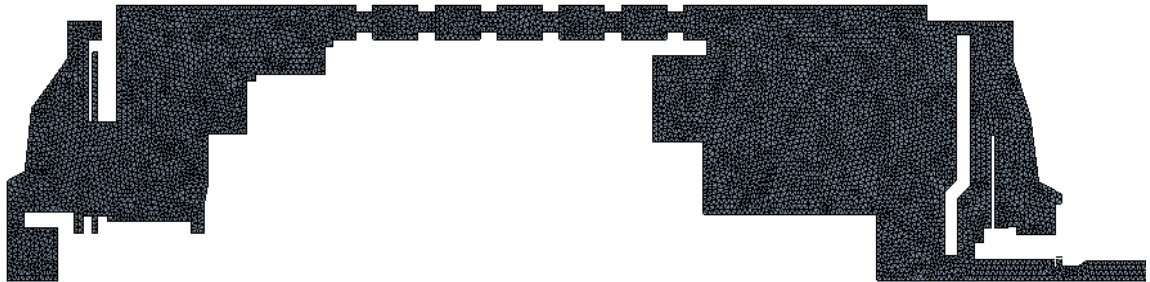


Fig. 2 Mesh system

다. Kim 등^[6]은 압축기의 동적 특성을 실험과 수치 해석을 통해 연구하였다. Bukac^[7]은 1D 집중모델을 이용해 밸브 형상 변화에 따른 거동 특성을 알아보았다. 또한 Silva and Deschamps^[8]는 밸브 간극에 따른 누설영향을 알아보고 이러한 누설이 압축기 효율을 최대 약 4% 감소시킴을 알아내었다.

최근 오일을 사용하지 않는 리니어 압축기의 개발로 리니어 압축기 열관리의 중요성이 커지고 있다. 오일을 사용하지 않는 리니어 압축기는 냉각에 도움을 주던 오일이 없어 압축실 및 모터에서 발생하는 열로 인해 오일을 사용하는 압축기 보다 과열도가 증가할 가능성이 있다. 흡입냉매의 과열도가 높아지면 냉매의 밀도가 낮아져 압축기 부피 효율이 감소한다. 이를 해결하기 압축기의 온도 분포를 예측할 수 있는 모델들이 개발되었다. 기존에 개발된 모델들은 1D lumped 모델을 활용한 모델로 분석 시간이 빠르다는 장점이 있어 지금까지 널리 사용되어왔다^[9]. 그러나 압축기 모델이 변경될 때마다 실험을 통해 보정해야 하는 단점이 존재한다.

최근 Oliveira 등^[10]은 1D lumped 모델과 정상상태 CFD 모델을 결합한 모델을 제안했다. 그들은 1D lumped 모델의 단점을 극복하고 선형 압축기의 과열도를 성공적으로 예측했다. 그러나 정상상태 CFD 모델의 한계로 인해 모든 과도현상을 포함하기는 어렵다. 이를 보완하기 위해 Hwang and Lee^[11]는 스프링 진동에 의한 내부 유동을 포함한 새로운 비정상상태 모델을 제안하였다. 하지만 쉘과 몸체 사이 간극이나 유로 형상 변화에 따라 압축기 몸체와 하우징의 열 성능에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 압축기 과열도를 낮추기 위하여 압축기 몸체와 하우징 사이 간극에 두 가지 형상의 리브를 적용하였다. 그리고 CFD를 이용해 비정상상태 수치해석을 진행하여 갭(gap) 유동에 따른 압축기 방열성능 변화를 알아보았다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 방법

리니어 압축기 간극 형상이 리니어 압축기 내부 스프링 진동에 의한 열전달 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 수치해석을 수행했다. Ansys Fluent^[12]를 이용하여 수치해석 하였으며 Fig. 1에 해석에 사용한 리니어 압축기 개략도를 나타냈다. 3차원 수치해석에 소요되는 시간이 과도하여 2차원 축대칭 모델로 가정하였다. 리니어 압축기는 리니어 모터를 이용해 피스톤을 작동시키는 과정에서 몸체도 진동한다. 측정 결과 몸체 진동에 의한 진폭은 약 1 mm, 주파수는 100 Hz로 이를 수치해석에 적용하였다. 몸체 진동에 의한 간극에서의 최대 유속은 약 2 m/s 내외로 층류에 해당해 층류(laminar)로 가정하여 수치해석 하였다. 또한 해석 시간 단축을 위해 고체영역을 제외한 셸내부 유동만 가정하였고 고체 표면에 실험에서 측정한 온도값을 적용하였으며 외부 대류열전달계수는 5 W/m²K, 외기온도는 25 °C로 가정하여 수치해석 하였다. 타임 스텝(time step)은 1×10⁻⁵ s이고 100 사이클 동안 유동 및 온도를 수렴시켜 분석하였다. 또한 대류에 의한 열성능 변화를 알아보기 위해 복사 열전달은 고려하지 않았다.

Fig. 2는 수치해석에 사용한 격자를 보여준다. 몸체 진동에 의한 왕복운동을 모사하기 위해 리메싱(remeshing)기법을 사용하여 수치해석 하였다. 이를 위해 약 13,000 개의 격자를 사용하였다.

압축기 하우징과 몸체 간극 형상에 따른 열전달 성능 수치해석을 위해 Fig. 3과 같이 리브를 적용하여 수치해석 하였다. 리브가 없을 때와 리브 형상이 삼각형과 사각형일 때 열전달 성능 변화를 살펴 보았다.

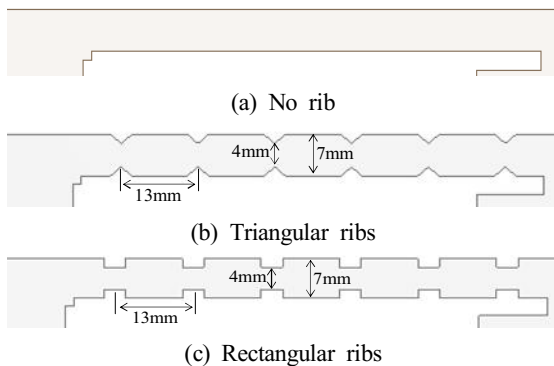
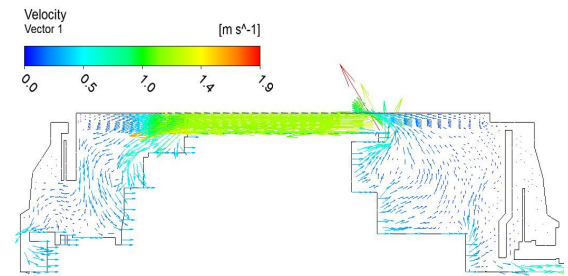


Fig. 3 Schematic of ribs

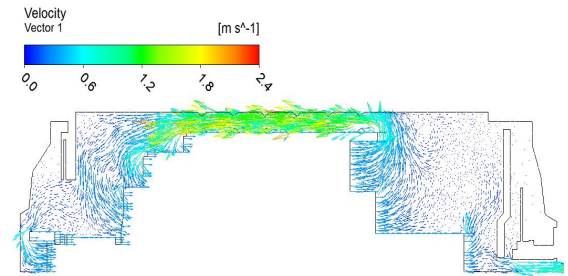
3. 결과 및 고찰

3.1 리브 형상에 따른 속도장 및 온도장 변화

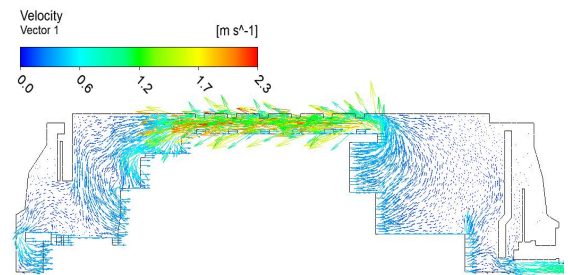
Fig. 4에 리브 형상에 따른 속도 벡터를 나타냈다. 이때 속도벡터는 하사점을 기준으로 위상각이 90°일 때를 나타낸다. 리브가 없고 간극이 7 mm 일 때 간극에서의 최대 유속은 약 1.9 m/s 이며 리브를 적용하게 되면 최대 유속은 약 20%이상 증가한다. 리브를 적용하면 유로의 폭을 좁게 만드는



(a) No rib



(b) Triangular ribs



(c) Rectangular ribs

Fig. 4 Velocity vectors in the gap

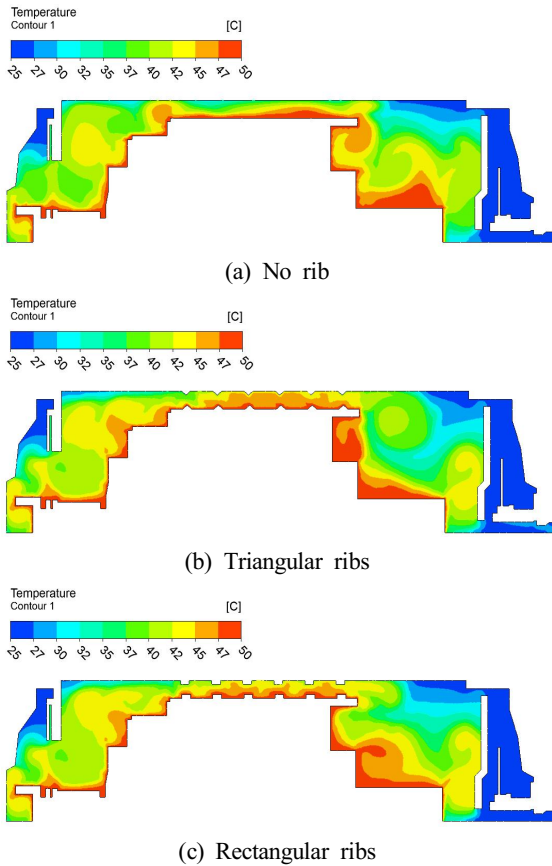


Fig. 5 Temperature contours

역할을 해 유속이 증가하게 되는데 리브 형상이 사각형일 때 보다 삼각형일 때 속도 증가량이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 대류 열전달계수도 사각형보다 삼각형일 때가 더 크다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 리브 형상에 따른 온도 분포를 보여준다. 전체적인 온도 분포는 유사하지만 간극에서의 온도 분포는 리브 형상에 따라 차이가 큼을 알 수 있다. 리브가 없는 경우 간극에서의 유속이 상대적으로 작고 층류에 해당해 간극 높이에 따른 온도 변화는 35~50 °C 인데 반해 리브를 적용하면 간극에서의 유속이 증가하여 열전달이 활발히 일어나 온도 범위가 약 42~50 °C로 감소한다. 특히 삼각형 리브일 때 온도 구배가 더 작아 열전달이 더욱 활발히 일어나는 것을 알 수 있다.

3.2 리브 형상에 따른 대류열전달계수 변화

Fig. 6은 100번째 사이클에서 시간에 따른 평균 대류열전달계수 변화를 보여준다. 이때 평균대류열전달계수는 식 $h = q''/\Delta T$ 를 사용해 압축기 하우징 내부 표면의 리브 부착 구간을 평균하여 구하였다. 여기에서 h 는 대류열전달계수, q'' 는 열유속 ΔT 는 내부 냉매 온도와 쉘 표면온도 차이이다. 한 사이클동안 시간에 따른 평균대류열전달계수는 세 경우 모두 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 평균대류열전달계수는 리브가 없는 경우가 약 2.6정도로 가장 낮고 사각형 리브, 삼각형 리브 순으로 증가하였다. 특히 삼각형 리브의 경우 리브가 없는 경우 대비 평균열전달계수가 약 60%증가하였다. 이러한 대류열전달계수 증가는 결과적으로 압축기 내부에서 발생하는 열을 외부 공기로 효율적으로 배출시켜 압축기 입구의 과열도 감소에 기여하게 된다.

Fig. 7에 시간이 1 s일 때 X축 좌표에 따른 대류열전달계수 변화를 나타냈다. Fig. 5에서와 같이 평균대류열전달계수는 시간에 따라 변화가 크지 않은 반면 위치에 따른 국소열전달계수 변화는 상당한 차이를 보여주고 있다. 먼저, 리브가 없는 경우가 열전달계수의 최대값과 최소값 변화가 가장 크게 나타났다. 또한 국소열전달계수는 양 끝단에

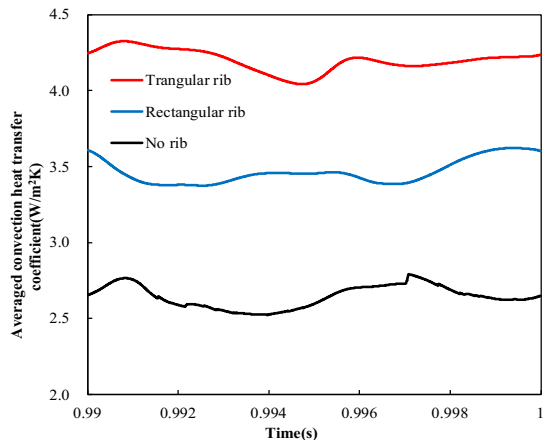


Fig. 6 Variation of convection heat transfer coefficient with time

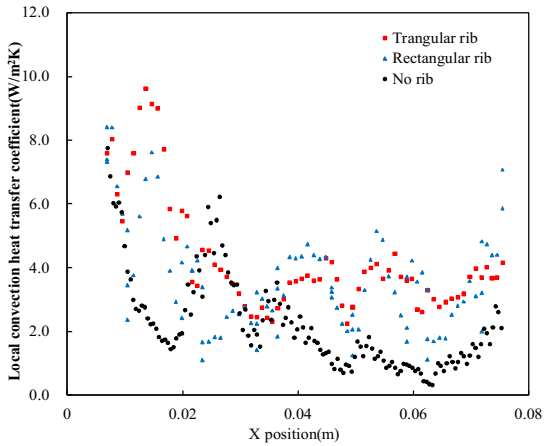


Fig. 7 Variation of convection heat transfer coefficient with X position

서 높고 중간 영역에서는 상대적으로 낮다. 반면 리브가 있는 경우는 중간 영역에서 열전달계수가 향상되어 평균열전달계수가 향상하였음을 알 수 있다. 특히 삼각형 리브의 경우 리브가 없는 경우 대비 국소열전달계수는 거의 전영역에 걸쳐 획기적으로 향상하였다. 따라서 갭 유동이 발생하는 하우스징 내부 표면에 리브를 가공한다면 충분히 압축기 EER 향상이 가능할 것으로 사료된다.

3.3 리브 형상에 따른 열전달율 변화

압축기 내부 표면에 리브를 가공하면 대류열전달계수는 사각형 리브, 삼각형 리브 순으로 순차적으로 증가함을 알 수 있었다. 하지만 실제 압축기 하우스징을 통해 방출되는 열량은 하우스징 내부 대류열저항 뿐만 아니라 하우스징 외부의 대류열저항과도 밀접하게 관련되어 있다. 본 연구에서 하우스징 외부 열저항은 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 고정시켰다. 또한, 방열량은 방열 면적과도 밀접한 관련이 있다. 이러한 방열면적은 당연히 리브를 만들면 증가하며 삼각형 리브보다는 사각형 리브가 상대적으로 크다.

Fig. 8에 100번째 사이클에서 시간에 따라 갭 유동이 발생하는 하우스징 영역에서의 열전달율 변화를 나타냈다. 시간에 따른 열전달율 변화는 세 가지 경우 모두 거의 일정하다. 리브가 없는 경우

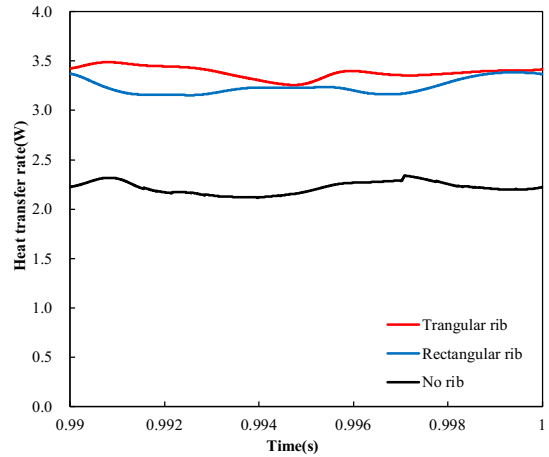


Fig. 8 Variation of heat transfer rate with time

열전달율은 약 2.2 W인데 리브가 있는 경우는 약 3.3 W로 증가하였다. 특히 삼각형 리브의 열전달율이 0.15 W 정도 더 많아 사각형 리브보다 근소하게나마 더 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 리니어 압축기의 과열도를 낮추기 위하여 압축기 내부의 고온 냉매에서 외부 공기로의 열전달을 향상 연구를 수행하였다. 이를 위해 압축기 바디 진동을 이용하면서 압축기 하우스징 내부 표면에 리브를 가공하여 방열율 변화를 알아보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 갭 유동영역에 리브를 적용하면 최대 유속은 약 20% 증가한다. 또한 유로가 좁아지는 효과와 더불어 전열면적도 증가한다.
2. 리브를 적용하면 획기적으로 평균대류열전달계수를 증가하는데 특히 삼각형 리브를 통해 가장 높은 대류열전달계수를 얻을 수 있었다.
3. 위치에 따른 국소대류열전달계수의 변화는 크지만 시간에 따른 평균대류열전달계수의 변화는 상대적으로 크지 않았다.
4. 리브를 가공하면 갭 유동 영역을 통해 추가적으로 약 1.5 W의 방열량이 증가하므로 이를 통해 압축기 EER 향상이 가능하다.

향후 이러한 리브를 통한 방열량 증가가 얼마나 압축기 냉력 혹은 EER을 개선시키는 지에 대한 추가 연구 및 리브 적용에 따른 피스톤 마찰 변화에 대한 연구가 필요하다.

후 기

“이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A1B02009582)의 연구과제입니다.”

REFERENCES

1. Choi, S., Han, U., Cho, H., and Lee, H., “Recent advances in household refrigerator cycle technologies”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 560-574, 2018.
2. Porkhial, S., and Khastoo, B., and Modarres, M. R., "Transient characteristic of reciprocating compressor in household refrigerators", *Applied thermal engineering*, Vol. 26, No. 14, pp. 1725-1729, 2002.
3. Hou, X., Gu, Z., Gao, X., Feng, S., and Li, Y., "Analysis of efficiency and power factor of reciprocating compressor unit under variable frequency and variable conditions," *Proceedings international compressor engineering conference*, Purdue University, 2008.
4. Choi, Y, S., Lee, J, H., Jeong, W, B., Kim, I, G., “Dynamic behavior of valve system in linear compressor based on fluid-structure interaction”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 14, pp. 1371~1377, 2010.
5. Hwang, I. S., Park, S. J., Oh, W. S., and Lee, Y. L., "Linear compressor discharge valve behavior using a rigid body valve model and a FSI valve model," *International Journal of refrigeration*, Vol. 82, pp. 509-519, 2017.
6. Kim, H., Roh, C. K., and Kim, J. K., "An experimental and numerical study on dynamic characteristic of linear compressor in refrigeration system", *International journal of refrigeration*, Vol. 31, pp. 1536-1543, 2009.
7. Bukac, H., "Understanding valve Dynamics", *Proceedings international compressor engineering conference*, Purdue University, 2002.
8. Silva, L. R., and Deschamps, C. J., "Modeling of gas leakage through compressor valves", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 53, pp. 195-205, 2014.
9. Park, M., Lee, J., Kim, H., Ahn, Y., “Experimental and numerical study of heat transfer characteristics using the heat balance in a linear compressor”, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 74, pp. 550~559, 2017.
10. Oliverira, M. J., "Modeling thermal compressor reciprocal linear operating without oil lube", *Federal de santa catarina university*, pp, 101-111, 2014.
11. Hwang, I. S., and Lee, Y. L., "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.
12. Ansys Fluent version 15, Ansys Inc.