

압축기 갭 유로 형상에 따른 압축기 EER 향상

한상혁*, 이영림**,#

*공주대학교 대학원 기계공학과, **공주대학교 기계자동차공학부

Improvement of Compressor EER Based on Shape of Gap Flow Passage

Sang-Hyeok Han*, Young Lim Lee**,#

*School of Mech. Eng., Graduate School, Kongju National Univ.,

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

(Received 05 November 2021; received in revised form 13 December 2021; accepted 14 January 2022)

ABSTRACT

Compressor efficiency must be improved to reduce refrigerator power consumption. In this study, the heat dissipation rate through the compressor housing is increased via gap flow passages between the compressor body and housing. Four types of gap flow passages are considered for achieving the maximum heat-dissipation rate. In addition, thermal analysis is performed to examine the effect of increased heat dissipation rate on the energy efficiency ratio (EER). The results show that the heat dissipation rate, compressor superheat, and compressor EER increased by up to approximately 52%, 3 °C, and approximately 1%, respectively.

Keywords : Refrigerant Compressor(냉매 압축기), Gap Flow(갭 유동), EER(에너지 효율), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

냉장고는 부패하기 쉬운 식품들을 보관하기 위한 가전제품으로 가정에 필수적인 제품 중 하나이다. 냉장고는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 이루어져 있으며 그 중 압축기는 전기를 사용하여 저온, 저압의 냉매를 고온, 고압이 되도록 냉매를 압축시키는 역할을 가지고 있다. 따라서 냉장고 소비 전력 대부분은 압축기를 통해 소비되며^[1] 압축기 효율과 냉장고 성능은 큰 연관성을 가지고 있다.^[2]

또한 압축기 효율 향상은 에너지 절약에 큰 도움이 된다.

초기 가정용 냉장고에는 주로 왕복동식 압축기가 사용되었다. 왕복동식 압축기는 회전모터를 이용해 가동되는데 이때 회전운동을 압축기 피스톤의 직선 왕복운동으로 변환시키는데 커넥팅 로드가 사용된다. 회전운동을 직선왕복운동으로 변환시키는 과정에서 마찰력에 의한 에너지 손실이 발생해 효율이 좋지 않다. 초기 리니어 압축기는 회전모터 대신에 리니어 모터와 영구자석, 스프링을 이용하므로 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 과정을 생략하여 왕복동식 압축기보다 효율이 좋았다. 하지만 인버터 기술을 통한 가변형 왕복동 압축기의 개발로

Corresponding Author : ylee@kongju.ac.kr

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

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그 격차는 많이 감소하였다.^[3] 따라서 리니어 압축기 효율을 더욱 향상시키기 위한 많은 연구들이 진행 중이다.

Oh 등^[4]은 리니어 압축기 머플러 형상에 따른 압축기 내부 냉매의 압력 차이와 EER 변화를 연구하였다. Binneberg 등^[5]은 인버터 기술을 이용해 압축기를 on-off 제어하여 냉장고 소비 전력을 감소시키는 연구를 진행했다.

최근 리니어 압축기 과열도 감소를 통한 압축기 효율 향상에 관한 연구도 진행되고 있다. Hwang과 Lee^[6]는 리니어 압축기 바디와 하우징 사이 갭 크기에 따른 압축기 방열량에 대한 연구를 진행하였다. Jang과 Lee^[7]는 리니어 압축기 하우징과 외부의 대류 열전달계수에 따른 EER 변화에 대한 연구를 진행하였다. Jeon 등^[8]은 그루브 위치가 피스톤과 실린더 사이 유향성능에 미치는 영향을 연구했으며 Hwang과 Lee^[9]은 하우징에 리브를 생성하여 하우징과 외부의 열전달을 촉진시켜 리니어 압축기 내부 온도를 낮추고자 하였다.

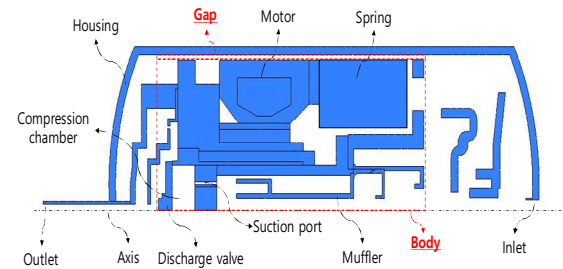
본 연구에서는 리니어 압축기 바디의 진동을 이용하여 갭 유동(gap flows)을 형성하고 이를 통해 압축기 방열량을 개선하고자 하였다. 이를 위해 리니어 압축기 모델을 단순화하고 바디가 진동할 때 바디와 하우징 사이에 갭 유동이 잘 형성되도록 갭 유로의 형상을 변경하였다. 최종적으로 이러한 갭 유동이 리니어 압축기 내부 온도분포와 흡입포트 온도, EER에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수치해석 방법

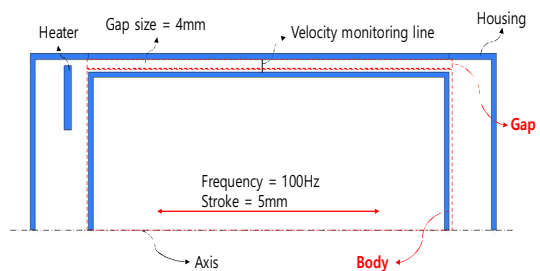
Fig. 1(b)에 갭유동 효과를 보기 위한 단순화된 리니어 압축기의 개략도를 나타냈다. 리니어 압축기 토출실을 모사하기 위해 왼쪽 영역 온도는 약 70°C로 설정하였다. 과도 해석을 하면 고체 영역은 수렴하는데 시간이 오래 걸린다. 따라서 고체를 포함하여 정상 상태 해석을 한 후에 고체 영역은 제거하고 경계에는 그 결과를 대입하여 과도 해석을 수행하였다. 수치해석에는 Ansys Fluent^[10]를 이용하였으며 격자의 개수를 줄이기 위해 2차원 축대칭 모델을 이용하였다. 격자는 Ansys mesh를 이용해 사각 격자를 생성하였고 사용된 격자는 약 9천개이

다. 압축기 바디 진동을 모사하기 위해 Ansys UDF^[10]를 통해 바디를 정현파(sine wave)로 제어하여 속도제어를 하였고 레이어링(layering) 기법을 이용한 동격자(moving mesh)를 통해 바디 진동수 100Hz, 바디 진폭 5mm로 진동시켰다. 진동수 100Hz, 진폭 5mm를 채택한 이유는 유로의 갭 효과를 최대화하기 위하여 오일 프리(oil-free) 압축기를 고려하였기 때문이다. 참고로 구동 주파수와 진폭은 압축기 바디를 지지하는 스프링을 통해 조절할 수 있다. 타임스텝(time step)은 1×10^{-5} s, 한 사이클(cycle)은 1000 타임스텝, 전체 계산 시간은 20 사이클이다. 난류 모델은 standard k- ϵ 을 채택하였고 외부 대류열전달계수는 $10\text{W/m}^2\text{K}$, 외부온도는 25°C를 고려하였다.

Fig. 2에 방열 성능 향상을 위해 고려한 갭 형상을 나타냈다. Model a는 방열 면적을 향상시키기 위해 타원 모양의 그루브(groove), model b는 방열 면적 향상과 갭 내부 유속을 증가시키기 위해 타원 모양의 리브(rib)를 갭 유로 모델에 추가한 모델이다. Model c는 제트 유동(jet flow)효과를 얻기 위해



(a) Original linear compressor



(b) Simplified gap model

Fig. 1 Schematics of the linear compressor model and the simplified gap model

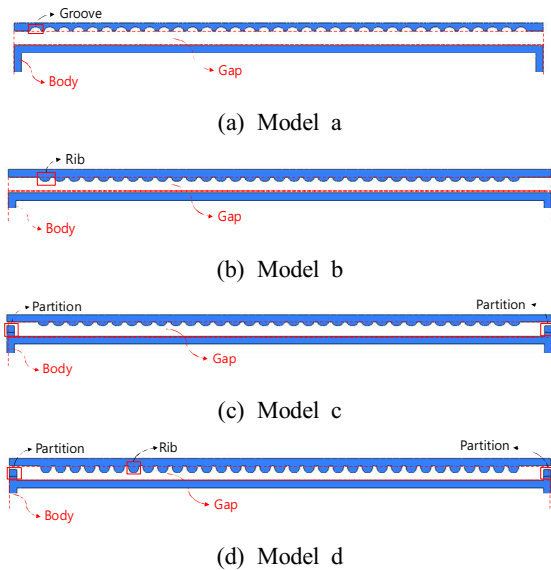


Fig. 2 Four gap models with varying gap flow passage

Table 1 Characteristic of simplified gap models

Model	Groove	Rib	Partition
Model a	○	×	×
Model b	×	○	×
Model c	×	○	○
Model d	×	○	○

Table 2 Sizes of groove and rib

	l (mm)	h (mm)
Model a	3	1
Model b	3	1
Model c	3	1
Model d	3	2

갭 양 끝에 파티션을 추가한 형상이며 파티션 유무의 차이를 극대화하기 위해 4mm 갭보다 1mm 작은 3mm로 설정하였다. Model d는 model c의 리브 높이를 증가시킨 모델이다. Table 1에 모델 특성을 나타냈고 Table 2는 각 모델에서 사용한 리브와 그루브의 치수를 보여준다. 여기서, 가로 길이는 l, 세로

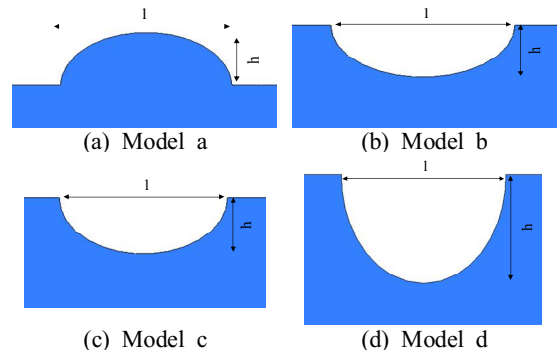


Fig. 3 Schematic of l and h

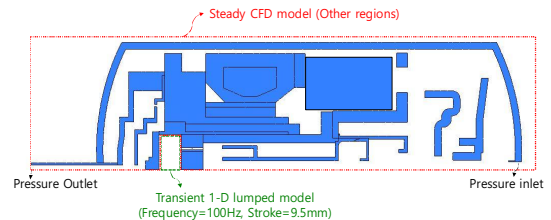


Fig. 4 Schematic of the coupled model with boundary conditions

길이는 h로 표현하였으며 자세한 내용은 Fig. 3에 나타냈다. 격자는 삼각 격자와 사각 격자를 혼합하여 생성하였고 수치해석 조건은 기본 모델과 동일하다.

Fig. 4에 수치해석에 사용된 리니어 압축기 열모델을 경계조건과 함께 나타냈다. 해석에 사용된 리니어 압축기 열모델의 경계조건 및 기타 자세한 수치해석 방법은 Hwang과 Lee^[11]에 자세히 나와 있다. 기본적으로 수치해석에는 Oliverira^[12]가 제안한 1차원 집중모델과 2차원 CFD 연계모델을 사용했다. 이는 압축실 내부에서 일어나는 냉매의 압축 및 팽창 과정은 1차원 비정상상태로 해석하고 그 외의 압축기 내 유동 및 열전달은 2차원 정상상태 해석을 하는 것이다. 좀 더 자세한 연계모델 관련 내용은 Oliverira^[12] 논문에 상세히 묘사되어 있다. 피스톤의 왕복 운동을 묘사하기 위해 피스톤의 속도를 정현파로 가정하였고 Fluent UDF를 이용했다. 피스톤 운동은 다음 식으로 묘사하였다.

$$v = a \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

이때 v 는 피스톤 속도이고 피스톤 진동수(f)는 100Hz, 상수 a 는 피스톤 진폭이 9.5mm가 되도록 조절하였다. 이러한 피스톤 운동은 압축기 하우징에 스프링으로 지지된 압축기 바디에 진동을 발생시킨다. 주변온도는 25°C이며 대류열전달계수는 3W/m²K이다. 수치해석에 사용한 냉매는 R600a real gas model이다.

한편 대류열전달계수(h_c)는 벽에서 열전달을 (q_w'')을 계산하고 벽함수를 사용하고 있으므로 벽 근처 셀의 온도(T_{cell})와 벽 온도(T_{wall})를 기준으로 다음과 같이 계산하였다.

$$h_c = \frac{q_w''}{T_{wall} - T_{cell}} \quad (2)$$

리니어 압축기 열모델에 사용된 EER 계산식은 다음과 같다.

$$(1) \text{ 압축기의 압축일 } (\dot{W}_{comp})$$

압축과정 전 냉매의 엔탈피 h_1 , 압축과정 후 고온 고압 냉매의 엔탈피 h_2 와 냉매의 질량유량을 통해 압축기의 압축일을 구하였다.

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3)$$

$$(2) \text{ 증발기의 흡입열량 } (\dot{Q}_{evap})$$

냉매가 증발기를 통과하기 전 엔탈피 h_4 와 통과한 후의 엔탈피 h_1 의 차이와 냉매의 질량유량을 곱하면 증발기의 흡입열량 즉 냉동능력이 된다.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

$$(3) \text{ 냉동사이클 성적계수 (COP)}$$

냉동사이클의 효율은 성적계수(COP : coefficient of performance)로 나타내는데 이는 압축기의 압축일과 증발기의 흡입열량을 통해 구할 수 있다.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 갭 유로에 따른 방열 성능 변화

갭 유로에 따른 방열 성능 변화를 알아보기 위하여 Fig. 1(b)의 단순화된 갭 유로 모델을 고려하였다. Fig. 5에 시간에 따른 갭 유로 모델(Fig. 1(b))의 대류열전달계수 변화를 나타냈다. 바디 속도가 증가할 때 갭에서 흐르는 유체 속도 또한 증가하기 때문에 대류 열전달계수가 증가한다. 대류열전달계수는 model c의 결과가 가장 높게 나오며 model d와의 차이는 미미하다. 그루브를 적용한 model a는 기본모델과 대류열전달계수 차이는 미미하다. 리브를 적용한 model b는 그루브를 적용한 model a 대비 대류열전달계수가 큰 폭으로 향상되었는데 이는 리브를 적용하면 유체가 유동하는 유로의 폭을 좁혀주는 역할을 하여 유체 속도가 증가하기 때문이다.

Fig. 6은 시간에 따른 방열량 결과를 보여준다. 방열량은 바디가 왼쪽으로 이동할 때 증가하고 오른쪽으로 이동할 때 감소하는데 이는 바디가 왼쪽으로 움직일 때 상대적으로 온도가 높은 왼쪽 영역의 유체가 오른쪽으로 유동하기 때문이다. 기본모델의 방열량이 가장 낮으며 model d의 방열량이 가장 높다. 방열량은 대류열전달계수와 달리 model a가 기본모델 대비 향상되었는데 이는 그루브를 적용하면 유체 속도 변화가 미미하여 대류열전달계수 변화 또한 작지만 방열면적이 증가하여 나타나는 결과이다. 또한 model c와 model d의 결과는 대류열전달계수의 결과와 반대로 나왔는데 이는 model d의 방열면적이 model c의 방열면적 대비 크게 증가하였기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 7은 바디 속도가 최대가 되는 시점에 파티션을 적용하지 않은 model b와 파티션을 적용한 model c의 최대속도 영역을 확대한 속도 벡터를 나타낸다. 파티션을 적용하지 않고 리브만 적용한 model b는 최대속도가 약 22m/s인 반면 파티션과 리브를 같이 적용한 model c는 최대속도가 약 55m/s이다. 갭 중간에서의 사이클 평균속도 변화는 미미하지만 최대속도가 큰 폭으로 증가한 결과 대류열전달계수 또한 향상되었다.

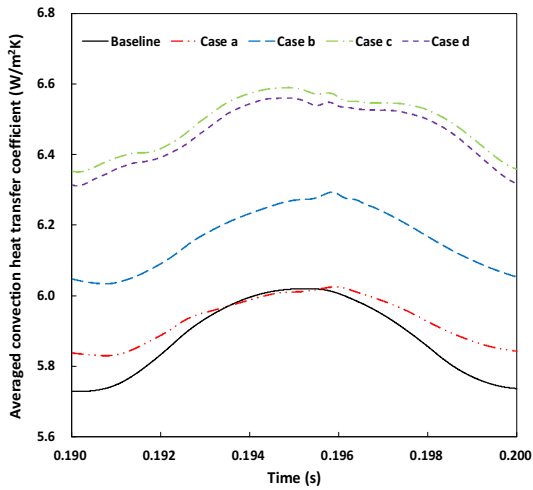


Fig. 5 Variation of averaged convective heat transfer coefficient with time for a cycle

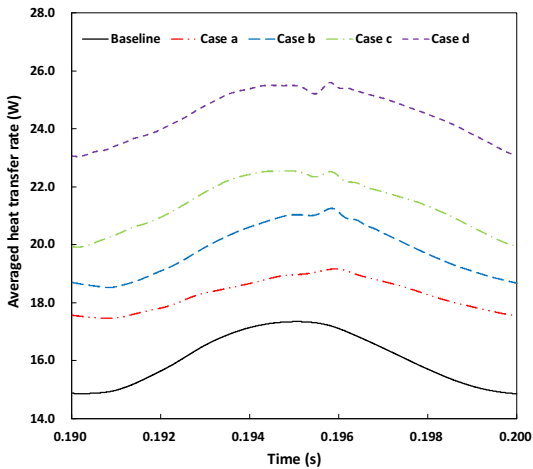


Fig. 6 Variation of total heat transfer rate with time for a cycle

Table. 3에 사이클 평균 결과를 기본모델 기준으로 무차원화 하여 나타냈다. 기본모델 대비 model d의 방열면적은 약 32% 증가하였고 속도는 10%, 대류열전달계수는 약 10% 증가하였다. Model d는 기본모델에 비해 사이클 평균 방열량이 약 52% 증가하여 가장 차이가 크기 때문에 model d 형상을 리니어 압축기 모델에 적용하였다.

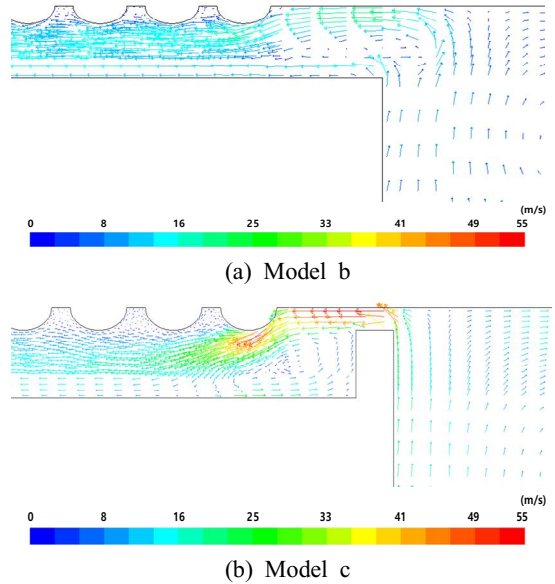


Fig. 7 Velocity vectors of model b and model c

Table 3 Normalized velocity (v), total heat transfer rate (q), convective heat transfer coefficient (h_c), inner housing surface area (A)

Model	v (%)	q (%)	h_c (%)	A (%)
Baseline	100.0	100.0	100.0	100.0
Model a	100.1	113.6	100.8	114.5
Model b	103.3	123.2	104.8	112.3
Model c	104.3	133.1	110.3	112.3
Model d	110.0	152.3	109.8	132.5

3.2 방열량에 따른 압축기 성능 변화

방열량에 따른 실제 압축기의 EER 변화를 알아 보기 위하여 Fig. 1(a)의 기본 모델을 고려하였다. 방열량은 압축기 하우징 외부 표면에 적용되는 대류열전달계수를 조절하며 변화시켰다. Fig. 8(a)는 기본모델의 온도분포, Fig. 8(b)는 방열량이 가장 향상된 model d의 온도분포를 보여준다. 최대온도는 냉매가 압축된 토출실에서 나타나며 기본모델은 약 93°C 이고 model d는 약 88°C이다. 압축실에서 압축된

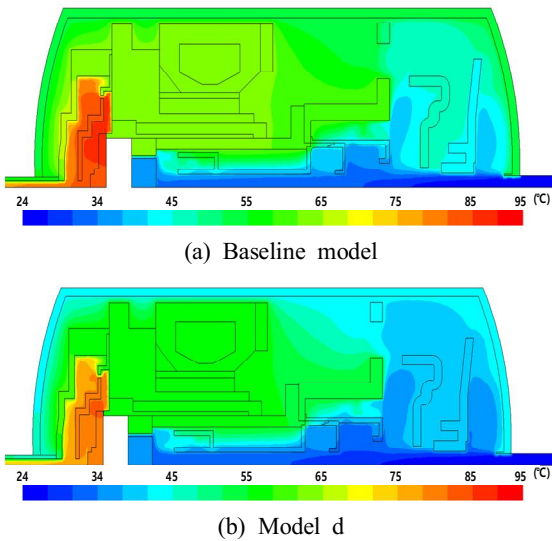


Fig. 8 Temperature contours for linear compressor

냉매는 토출실로 방출되는데 이때 냉매의 온도와 압력은 상승하여 하우징 내부의 냉매 온도를 상승시킨다. 압축기 내부 냉매 온도가 상승하면 흡입 파이프에서 압축실로 들어오는 흡입 냉매 온도 또한 상승하므로 이는 압축기의 체적효율을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 흡입 냉매가 압축기 내부 냉매 온도를 증가시키지 않도록 흡입포트의 온도를 낮추는 것이 중요하다. Model d의 경우 압축기 내부 전체 온도분포는 기본모델 대비 경향은 유사하지만 압축기 평균 내부온도와 하우징 온도는 저감되었다. 특히 흡입포트의 온도는 약 3°C 감소하였다. 이에 따라 압축실로 흡입되는 냉매 밀도는 증가하여 질량유량은 상승하게 된다. 그 결과 압축일은 거의 변화가 없고 냉력은 약 1% 상승하여 최종적으로 EER은 약 1% 증가하였다.

4. 결론

본 연구에서는 리니어 압축기 바디와 하우징 사이의 갭 유동을 이용해 방열량을 향상시키고자 하였다. 이를 위해 갭 유로를 4가지 형상으로 변경시키며 방열해석을 수행하였다. 또한 향상된 방열량이 압축기의 흡입포트 온도, 압축일, 냉력, EER 등에 미치는 영향을 알아보기 위하여 비정상 1차원

집중모델과 정상 2차원 축대칭 모델을 연계한 압축기 열모델 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

갭 유로에 그루브를 적용하면 방열면적은 증가하지만 대류열전달계수의 변화는 미미하다. 갭 유로에 리브를 적용하면 방열면적과 대류열전달계수가 동시에 증가한다. 리브에 파티션까지 적용하면 대류열전달계수가 더욱 증가되어 방열량이 최종적으로 약 52% 향상된다.

이 같은 방열량 향상은 압축기 과열도를 약 3°C 효과적으로 감소시키고 EER 또한 약 1% 정도 향상시켰다.

후 기

“이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A1B02009582)의 연구과제임. 또한 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004)의 일부 지원으로 수행되었음.”

REFERENCES

1. Porkhial, S., Khastoo, B. and Modarres Razavi, M. R., "Transient characteristic of reciprocating compressor in household refrigerators", Applied thermal engineering, Vol. 26, No. 14, pp. 1725-1729, 2002.
2. Lee, H. K., and Jung, W. H., "Development of the linear compressor for a household refrigerator", Proceedings international compressor engineering conference, Purdue University, 2000.
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. Oh, H. J., Kong, S. C., Oh, W. S. and Park, K. B., "Numerical simulation for the internal flow analysis of the linear compressor with improved

- muffler", Proceedings international compressor engineering conference, Purdue University, 2016.
5. Binnberg, P., Kraus, E. and Quack, H., "Reduction in power consumption of household refrigerators by using variable speed compressor", International refrigeration and air conditioning conference, 2002.
 6. Hwang, I. S. and Lee, Y. L., "A study on the cooling of high temperature refrigerant inside a compressor using compressor body vibration", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 23, No. 1, pp. 50-55, 2021.
 7. Jang, Y. N. and Lee, Y. L., "Effects of a cooling fan in the machine room on the performance of a compressor", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 48-54, 2018.
 8. Jeon, W. J., Son, S. I., Lee, H., Kim, J. W. and Kim, K. W., "Influence of groove location on lubrication characteristics of the piston and cylinder in a linear compressor", Journal of Korean Society of Tribology and Lubrication engineers, Vol. 32, No. 1, pp. 24-31, 2016.
 9. Hwang, I. S. and Lee, Y. L., "Improvement of compressor-cooling efficiency based on ribs", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 70-75, 2021.
 10. Ansys Fluent version 15, Ansys Inc.
 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. Oliverira, M. J., "Modeling thermal compressor reciprocal linear operating without oil lube", Federal de Santa Catarina university, pp. 101-111, 2014.