

Solenoid 전동기의 냉각을 위한 수치해석적 연구

정민채*, 윤상길**, 윤동진**, 서정세***,#

*경상대학교 융합기계공학과, **동원테크, ***경상대학교 기계공학부

Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristics inside a Solenoid Motor System

Min-Chae Jung*, Sang Gil Yoon**, Dong Jin Yoon**, Jeong-Se Suh***,#

*School of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,

Dong Won Tech., *School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National UNIV.

(Received 5 March 2020; received in revised form 9 March 2020; accepted 11 March 2020)

ABSTRACT

In this study, the temperature distribution and heat transfer characteristics of each component in a solenoid motor system were numerically investigated when heat is generated by the steel pad attached to the solenoid ring of the motor. It was found that the internal airflow was complicated by the inflow velocity of air and the rotation of guide rollers and solenoid rings. Based on the numerical results, the tendency for temperature changes in the steel panel was lower due to the contact of the cooling air in the front in the rotational direction, and the peak temperature was at the front of the center. In particular, it was confirmed that as the air inflow rate was increased, the temperature was reduced due to strong convection. The temperature of the iron plate pad was decreased as the convective heat transfer coefficient was linearly increased with increasing airflow around the solenoid ring. In addition, the temperature of the iron plate panel was rapidly increased with increasing heat generation.

Key Words : Solenoid(솔레노이드), Motor(전동기), Air(공기), Cooling(냉각), Numerical Analysis(수치해석)

1. 서 론

기존 내연기관형 자동차에서 배출되는 오염물질로 인한 환경문제를 극복하기 위해 친환경 자동차로서 전기자동차 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 이러한 전기차의 핵심부품 중의 하나가 구동모터이며, 내연기관 자동차의 엔진에 해당하는 역할을 한다. 또한, 최근에는 이동수단의 소형화로 인

해 스쿠터 및 전동 소형차 등에도 소형 전동모터를 장착하고자 하는 요구가 증대되고 있으며, 이러한 이동수단에 사용되는 전동기는 고토크화, 고속화, 고밀도화, 고효율화가 매우 요구된다. 고토크화 및 고효율화 전동모터를 구현하기 위해 기존의 BLDC 모터한계를 극복하기 위한 일환으로, 솔레노이드 현상에 의해 발생하는 인력을 이용하여 구동력을 얻는 솔레노이드형 전동기를 개발하고자 하며, 이러한 솔레노이드형 전동기의 기본적인 구성이 Fig. 1과 같이 솔레노이드 링(solenoid ring)과 동력을 전달하는 유성기어로 이루어져 있다. 효율적인 전동

Corresponding Author : jssuh@gnu.ac.kr
Tel: +82-55-772-1625, Fax: +82-55-772-1577

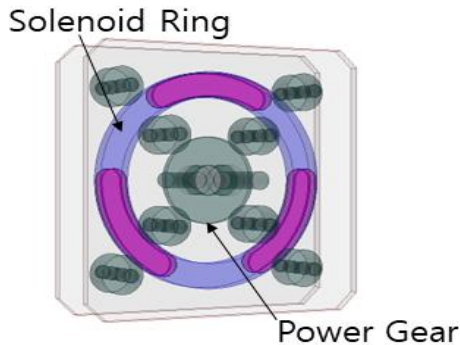


Fig. 1 Schematic diagram of the solenoid motor system

차용 고밀도 솔레노이드 전동기를 설계하기 위해서는 적절한 전자기 설계도 중요하지만, 기존의 전동기와 마찬가지로 고출력으로 인해 전동기 내부의 열발생을 효율적으로 방출하기 위한 최적의 냉각 설계가 필요하다^[1]. 특히, 이러한 신개념의 구동시스템인 솔레노이드 전동기의 설계핵심 기술 중의 하나인 냉각 기술은 전동기의 고효율, 고성능화, 시스템 소형화 및 내구성 확보에 밀접한 관련이 있다. 전동기 냉각 기술은 전기자동차 및 플러그인 하이브리드 자동차에서 구조상 차륜 내에 위치하기에 기존의 전동기와 같이 냉각수 배관을 연결하기가 어렵고, 외부로 부터 보호되어야 하는 이유로 인해 공랭식 반밀폐형 구조로서 냉각에 매우 불리한 요인이기 때문에, 전동기의 하우징 방열 설계가 더욱 중요하다.

지금까지 전동기 냉각에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 주로 일반적인 원형 전동기 내부의 열 유동을 파악하기 위해서 내부 틈새의 열전달 특성 연구^[2]와 밀폐구조를 갖는 BLDC 전동기의 열 특성과 수명과의 관계에 대한 연구^[3], 냉각팬을 갖는 외형 BLDC 전동기의 열유동을 수치해석적으로 해석한 방법^[4], FEM(Finite Element Method)를 사용하여 BLDC 전동기의 열전달을 해석하였다^[5]. 또한, Farsane 등^[6]은 일반유도 전동기의 외부 열교환 면적 및 유동 분배를 향상시키기 위해, 외부 하우징에 부착되는 방열핀의 형상을 변경하는 연구를 하였으며, 기존 보다 냉각성능을 10% 가량 개선하였다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 기존의 전동기와 다른 솔레노이드 전동기의 솔레노이드 링(solenoid ring)에 부착된 철심패드(steel pad)의 방열로 인해 각 부품별 온도 분포 및 열전달 특성을 파악하고자 하며, 차량 주행 속도를 고려하여 공기의 유속변화, 전동기의 회전수에 따른 냉각특성에 대해서도 살펴보하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 문제설정 및 지배방정식

솔레노이드 전동기는 철심 패드(pad)가 장착된 링(ring)에 솔레노이드 원리에 의한 인력을 작용시켜 이를 회전력으로 변환하여 회전 출력을 얻는다. 솔레노이드 인력이 작용하는 링은 회전하면서 Fig. 1에서와 같이 8개의 가이드 롤러(guide roller)에 의해 회전 균형을 잡으면서 중심부에 위치한 출력기어(power gear)에 동력을 전달하게 된다. 플라스틱 솔레노이드 링(solenoid ring)에 부착된 철심 패드(pad)에서 솔레노이드 원리에 의한 자력으로 인해 열이 발생하게 되며, 이러한 발생열을 효율적으로 냉각하지 않을 경우에 자력감소로 인한 전동기의 출력 감소가 발생한다. Fig. 2는 솔레노이드 전동기내 열전달과 회전안정성을 고려해 알루미늄 가이드 롤러(guide roller)와 솔레노이드 링, 그리고 출력기어(power gear)의 배열 및 회전방향을 나타내었다. 그림에서 8개의 가이드 롤러를 지지하는 폭 W의 정사각형 알루미늄 평판 2개가 H의 간격을 유지하고 있으며, 그 사이에 가이드 롤러 및 솔레노이드 링, 출력기어 등이 방사형으로 배치되어 있다. 솔레노이드 전동기(motor)는 자력으로 인한 회전과정에서 솔레노이드 링(solenoid ring)에 부착된 철심 패드(pad)에 열이 발생하게 되며, 발생하는 열을 효과적으로 냉각하기 위해, 외부에서 T_i 의 온도를 가지고 U의 속도로 균일하게 진입하는 공기유동에 의해 냉각이 이루어지고 있다. 전동기 주위로 흐르는 공기의 밀도는 부력에 의한 유동을 고려하는 것이외에는 온도와 무관하게 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서는 고정 격자계(fixed grid)와 연속적 기법(continuum formulation)에 기초하여 전동기 주위의 냉각과정을 3차원 정상상태에서 수치해석을

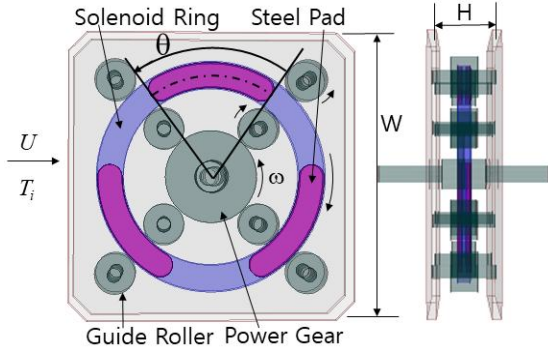


Fig. 2 Schematic diagram of the component arrangement in the solenoid motor system

하고자 한다. 전동기를 구성하고 있는 철판벽내 열 전달을 전도열전달 방정식을 적용하여 고려하였으며, 전동기 주위로 흐르는 공기의 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 각각 텐서의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \Phi \quad (3)$$

여기에서의 엔탈피 h 는 비열과 온도의 함수인 $c_p T$ 로 표기되며, Φ 는 기계 에너지의 열 에너지로 변환되는 것을 나타낸다^[7].

2.2 해석방법 및 조건

솔레노이드 전동기 주위로 흐르는 공기는 25°C의 온도로 균일한 속도로 유입되는 것으로 하였다. 공기의 밀도는 일정하다고 하였으나, 솔레노이드 링 내 철판 패드의 가열로 인한 주변 가열공기의 부력을 고려하기 위한 공기의 온도에 따른 밀도변화를 고려하였다. 솔레노이드 전동기의 크기 및 공기의 유입온도, 공기의 유속에 대한 기본조건이 Table 1 과 같다.

Table 1 Configuration reference conditions for the solenoid motor system

Specification	Physical Values
Motor Plate Width (W)	310 mm
Motor Plate Gap (H)	70 mm
Radius of Powe Gear (R_p)	52 mm
Radius of Solenoid Ring (R_s)	130 mm
Radius of Guide Roller (R_g)	24 mm
Rotation Speed of Powe Gear (ω)	2400 rpm
Inlet Temperature of Air (T_i)	300 K
Inlet Velocity of Air (U)	2 m/s
Heat Generation of Steel Pannel	10 W

전동기 주위의 공기의 냉각과정을 수치해석적으로 해석하기 위하여 유한체적기법을 사용하여, 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 등의 지배방정식이 이산화되었으며, 대수 방정식으로 정리해서 상용 CFD Solver인 Star-CCM+를 사용하여 최종적으로 해를 구하였다. 대류항에 대해 결합모델(coupled model)을 적용하였으며, 난류에 대해서는 $k-\epsilon$ 표준모델을 적용하여 속도장 및 온도장을 계산하였다. 계산에 사용된 격자는 사면체(quadrilateral)격자를 기본으로 하여, 벽면에서 점성력 및 결빙층의 정밀한 계산을 위해 곡면격자계(body-fitted coordinate)를 적용하였으며, 격자수는 약 1,000천 개 정도 사용되었다.

본 연구의 수치해석에 사용된 수치적 모델에 대한 검증에 대해서는 참고문헌 (8,9)에 자세히 언급되어 있으며, 실험결과와 본 연구의 해석결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 솔레노이 전동기 주위의 열유동 특성

솔레노이드 전동기 내로 공기가 흐르면서 전동기 하우징내에 배열된 부품들 주변의 외표면에서 냉각이 이루어지게 되며, 이러한 냉각현상을 가장 대표

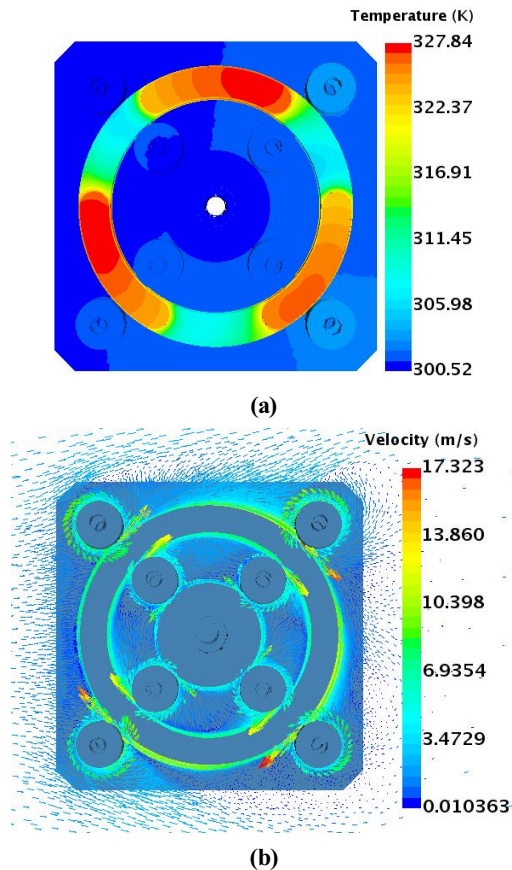


Fig. 3 Distributions of temperature and velocity inside solenoid motor : (a) temperature, (b) velocity

적인 Table 1의 조건을 기준으로 살펴보고자 한다.

Fig. 3은 전동기 구조물내의 온도분포와 전동기 주변으로 흐르는 공기의 속도분포를 나타내었다. 먼저 Fig. 3(a)에서 솔레노이드 전동기내 온도변화를 살펴보면 알루미늄으로 만들어진 하우징내의 온도는 전도열전달에 의해 거의 공기로 인한 하우징 내벽의 온도와 일치하게 형성되고 있으나, 솔레노이드 링 주변으로 갈수록 온도가 상승함을 확인 할 수 있다. 특히, 솔레노이드 현상에 의해 주로 열이 발생하는 솔레노이드 철심 패드 내에서는 원주 방향으로 온도변화가 심하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 출력기어와 반대방향인 시계방향으로 회전하는 솔레노이드 링에 탑재된 철심패드는 회전방

향에 따른 구조상의 특징으로 인해 냉각공기에 오래동안 노출되는 뒤쪽으로 갈수록 냉각에 따른 온도감소가 많이 이루어지며, 철심의 전면부도 냉각공기에 일차적으로 접촉하게 되어 온도강하가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 공기의 유입 유동 및 가이드 롤러 및 솔레노이드 링의 회전으로 인해 전동기 내부에서 유동이 활발하게 이루어지고 있음에도 불구하고, 솔레노이드 링에 부착된 철심 패드내의 발열이 접촉된 주변의 가이드 로러 등으로 열전달이 잘 이루어지지 않고 있다. 이는 철심 패드를 탑재한 솔레노이드 링이 솔레노이드 효과에 의한 인장력을 극대화하기 위해 부도체인 플라스틱 소재로 이루어져 전도 열전달이 잘 이루어지지 않기 때문이다. 따라서, 솔레노이드 링에 부착된 철심 패드의 발열을 효과적으로 냉각하기 위해서는 전동기내의 공기유동에 의한 대류 냉각이 무엇보다 중요하며, 이를 파악하기 위해 유동특성을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 그림에서 보면은 전동차의 주행과 가이드롤러 및 솔레노이드 링이 회전으로 상당히 복잡한 내부 공기유동이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 공기유입 속도의 영향

유입되는 낮은 온도의 공기로 인해, 전동기 철판 패널에서 발열로 인한 온도상승을 억제하게 된다. 이러한 영향이 철판패널의 온도에 미치는 영향을 파악하기 위해, 유입되는 공기의 유속 U 를 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s로 변화시켰을 때의 철판패널의 온도분포 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 철판패널의 온도분포는 Fig. 2에 나타난 철판패널의 중심호(arc)위의 화살표방향(즉, 회전방향)으로 대응하는 각도에 따라 온도분포를 나타내었으며, 점선은 1 m/s를, 실선은 2 m/s를, 그리고 굵은 점선은 3 m/s의 경우를 각각 나타낸다. 철판패널의 온도변화 경향을 보면은 회전방향으로 앞쪽에서 냉각공기의 접촉으로 온도가 낮다가 중심부로 오면서 높아지며, 뒤쪽으로 갈수록 후류의 영향으로 온도가 낮아지는 특성을 보이고 있다. 특히, 철판패널의 최고점 온도가 패널 앞쪽에서 형성되고 있다. 공기의 유속이 증가할수록 패널의 온도가 전반적으로 강한 대류의 영향으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

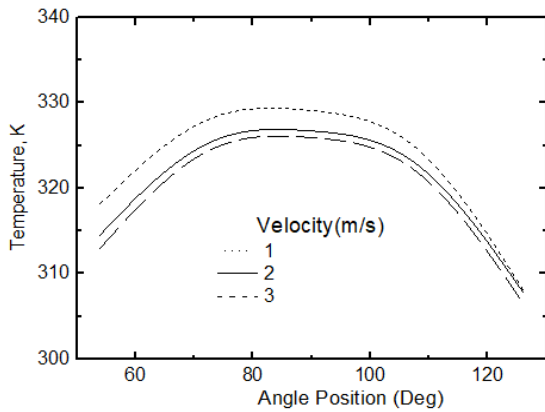


Fig. 4 Temperature distributions along the arc center line of the steel panel surface on the solenoid ring with the inlet velocity of air to the motor

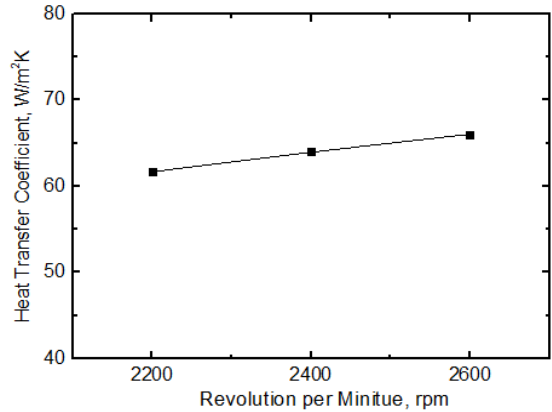


Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient of the steel panel surface on the solenoid ring with the revolution velocity of power gear in the motor

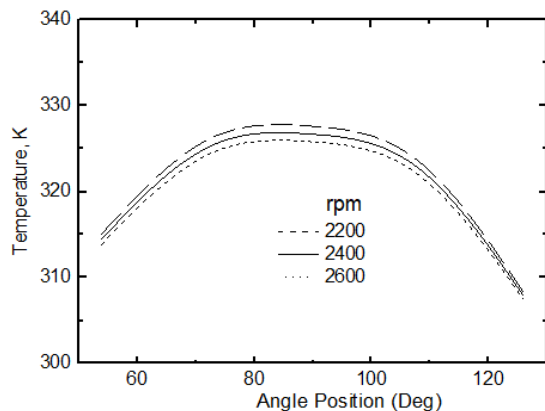


Fig. 5 Temperature distributions along the arc center line of the steel panel surface on the solenoid ring with the revolution velocity of power gear in the motor

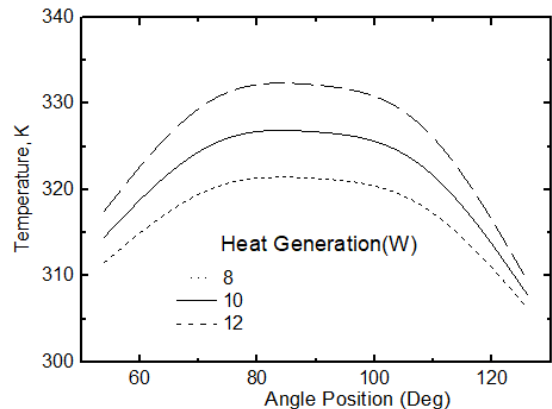


Fig. 7 Temperature distributions along the arc center line of the steel panel surface on the solenoid ring with the heat generation in the steel panel of motor

3.3 회전수의 영향

출력기어의 회전수에 대응하여 솔레노이드 링이 회전수가 바뀌게 된다. 이러한 회전수 변화에 따라 솔레노이드 링에 부착된 철판의 냉각으로 인한 온도변화 특성을 파악하고자, Fig. 5에 온도분포를 나타내었다. 점선은 2200rpm을, 실선은 2400rpm을, 그리고 굵은 점선은 2600rpm을 각각 나타낸다.

출력기어의 회전수 증가에 따라 철판패드의 온도가

전반적으로 감소하고 있음을 그림에서 확인 할 수 있다. 이는 회전수 증가에 따른 솔레노이드 링주변의 공기유동 증가로 인한 대류열전달이 증가하게 되는 데 기인함을, 대류열전달가 회전수에 따라 선형적으로 증가하는 Fig. 6에서도 확인 할 수 있다.

3.4 발열량의 영향

솔레노이드 링에 부착된 철판패드에서 발생하는

열을 효과적으로 제거하는 것이 매우 중요하며, 이를 파악하기 위해 철판패드내에 발열량에 따른 철판패드의 온도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 점선은 8W를, 실선은 10W를, 그리고 굵은 점선은 12W를 각각 나타낸다. 철판패드내의 온도분포 경향은 이전의 것과 비슷하게 나타나고 있으나, 발열량이 증가할수록 온도가 급격하게 상승하는 것을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전동기의 솔레노이드 링에 부착된 철판패드의 발열로 인해 각 부품별 온도 분포 및 열전달 특성을 파악하였다. 전동차의 주행으로 인한 공기의 유입속도와 가이드롤러 및 솔레노이드 링이 회전으로 인해 발생내부 공기유동이 상당히 복잡하게 이루어짐을 알았다. 수치해석적 결과에서 철판패드의 온도변화 경향이 회전방향으로 앞쪽에서 냉각공기의 접촉으로 온도가 낮다가 중심부 앞쪽에서 최고점 온도가 나타남을 알았다. 특히, 공기 유입속도가 증가할수록 강한 대류의 영향으로 낮아지는 것을 확인한다. 회전수 증가에 따라 솔레노이드 링주변의 공기유동 증가로 인한 대류열전달계수가 선형적으로 증가하면 철판패드의 온도가 전반적으로 감소함을 알았다. 또한, 발열량이 증가할수록 철판패드의 온도가 급격하게 상승함을 알았다.

REFERENCES

1. Andreas, J. C., "Energy-Efficient Electronic Motor," Selection and Application, Marcel Dekker Inc., pp. 243~245, 1992.
2. Pelle, J., Harmand, S., "Heat Transfer Measurements in an Opened Rotor-Stator System Air-Gap," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 31, Issue 3, pp. 165~180, 2007.
3. Lee, T.-G., Moon, J.-S., Yoo, H., Lee, J.-H., "Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High Speed Axial Fan by the Accelerated Life Test," Journal of the SAREK, Vol. 17, No. 12, pp. 1169~1176, 2005.
4. Kang, S., Lee, K.-S., Wang, S., Shim, H., "Thermal and Flow Analysis of Outer-Rotor Type Bldc Motor," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, No. 31, Vol. 9, pp. 772~779, 2007.
5. Cassat, A., Espanet, C., Wavre, N., "BLDC Motor Stator and Rotor Iron Losses and Thermal Behavior Based on Lumped Schemes and 3-D FEM Analysis," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 3, 2003.
6. Farsane, K., Desevaux, P., Panday, P. K., "Experimental Study of the Cooling of a Closed Type Electric Motor," Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 14, pp. 1321-1334, 2000.
7. Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Fundamentals of heat transfer, 6th, John Wiley and Sons, Inc., 2014.
8. Lee, C. H., Suh, J. S., "Numerical Analysis on the Freezing Process of Internal Water Flow in a L-Shape Pipe," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 144-150, 2018.
9. Park, Y. S., Sung, H. S., Suh, J. S., "A Study on the Basic Shape of an MF Evaporator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 6, pp. 39-44, 2019.