

여러 종류의 재질을 이용한 평판상 착상 거동에 대한 실험적 연구

이장석[†]·지성^{*}·박진구^{*}·이관수^{**}

Experimental Study of the Frosting Behavior on Various Plain Plate

Jang-Seok Lee, Sung Jhee, Jin-Koo Park and Kwan-Soo Lee

Key Words: Frost Formation(착상), Thermally Conductive Plastic(열전도성 플라스틱), PBT(폴리부틸렌 테레프탈레이트), PTFE(폴리테트라플루오로에틸렌), Hydrophilic(친수성), Hydrophobic(발수성), Heat and Mass Transfer(열 및 물질전달)

Abstract

An experimental study has been carried out to investigate the frosting behaviors of thermally conductive plastic(PBT based resin) resin by comparing with those of aluminum and some plastic(PTFE based resin) test specimens. It is found that the frosting behavior of plastic specimens with 1 mm thickness show similar trend with aluminum except PTFE. The properties of frost formed on the specimens are affected by both thermal conductivity and surface characteristics (hydrophilic/hydrophobic) of the materials. It can be said that the heat and mass transfer rate of plastic materials are almost equivalent with those of aluminum.

기호설명

A : 시험 시편 면적 [m ²]	x_f : [mm]	
c_p : [kJ/kg · °C]		그리스 문자
h_{sv} : [kJ/kg]		
k : [W/m · °C]	ρ : [kg/m ³]	
m_f : [kg]		하첨자
\dot{m} : [kg/s]	a : 공기층	
Q : [W]	in : 입구	
T : [K]	out : 출구	
t : [min]		
u : [m/s]		
w : [kg _w /kg _a]		

1. 서론

생활 수준의 향상에 따라 보다 쾌적한 환경 및 편리한 시설에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 냉동, 공조 산업은 지속적인 발전을 이루고 있으며, 특히 열교환기에 대해서

[†] LG전자 디지털어플라이언스 연구소

^{*} LG전자 디지털어플라이언스 연구소

^{**} 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0426, FAX : (02)2295-9021

는 형상 및 소재에 대하여 폭넓게 연구 개발되고 있다. 열교환기의 주요 연구 목적은 열전달 면적과 열전달 계수를 증가시키고 열저항을 감소시켜 성능을 향상시키는 한편 가능한 한 원가를 절감하는 데 있다. 대표적으로 현재 사용되고 있는 열교환기는 열전도성, 가공성, 내압성, 내구성 등을 고려한 금속재 환-관 열교환기가 주종을 이루고 있다.

열교환기의 소재와 관련된 연구로는 크게 금속 재료 열교환기의 표면 처리를 통하여 목적하는 특성을 구현하는 분야⁽¹⁻⁵⁾와 소재를 비금속 재료인 플라스틱을 사용하여 원가 절감 및 기능성을 추구하는 분야⁽⁶⁻⁹⁾로 나눌 수 있다. 금속이 아닌 플라스틱을 열교환기 재료로 사용할 경우, 산업계에서 문제시 되고 있는 부식에 대응할 수 있으며, 경량화가 가능하고 금속에 비해 상대적으로 낮은 재료비와 가공비를 고려할 때 경쟁력이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 낮은 열전도 계수 및 내압성의 문제점으로 인해 실용화에 대한 연구는 미진하며, 또한 착상을 수반하는 열교환기에 대한 적용성 여부에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러나 최근에는 기존 플라스틱의 낮은 열전도성을 10~100배 개선하여 1~30 W/m°C의 계수를 갖는 열전도성 플라스틱들이 개발되고 있다.

따라서 본 연구에서는 착상을 수반하는 열교환기에 대한 플라스틱의 적용성과 착상 거동 특성을 파악하기 위해 PBT(polybutylene terephthalate)

계열의 열전도성 플라스틱과 PTFE (polytetrafluorethylene) 계열의 플라스틱 그리고 알루미늄 시편에 대해 착상 실험을 수행하여 재질별 착상 거동 특성을 조사한다. 이를 통하여 열전도성 플라스틱 수지의 열교환기 적용을 위한 기본적인 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

이 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 이 장치는 시험 시편이 장착되어 있는 시험부, 공기를 순환시키는 순환부, 시편의 온도를 유지하기 위한 냉각부, 그리고 냉각부인 열전소자(TEM, thermoelectric module)에 전원을 공급하는 전원부로 구성되어 있다. 시험부 입구 공기의 시험 조건을 조절하기 위하여 착상 실험 장치는 항온항습실 내에 설치하였다.

항온항습실에서 시험 조건으로 조절된 공기는 시험부로 유입된다. 시험부로 유입되는 공기는 순환부에 장착된 송풍기에 의해 유량이 조절되며, 시험부 입·출구에 flow straightener를 삽입하여 기의 유동을 균일하게 하였다. 시험부는 아크릴판으로 제작하였으며, 공기 유로의 높이는 100 mm이다. 시험 시편의 두께는 기존의 열교환기의 관 두께와 냉매의 침투성(permeation)을 고려하여 1.0 mm로 하였다. 시험부의 입·출구에는

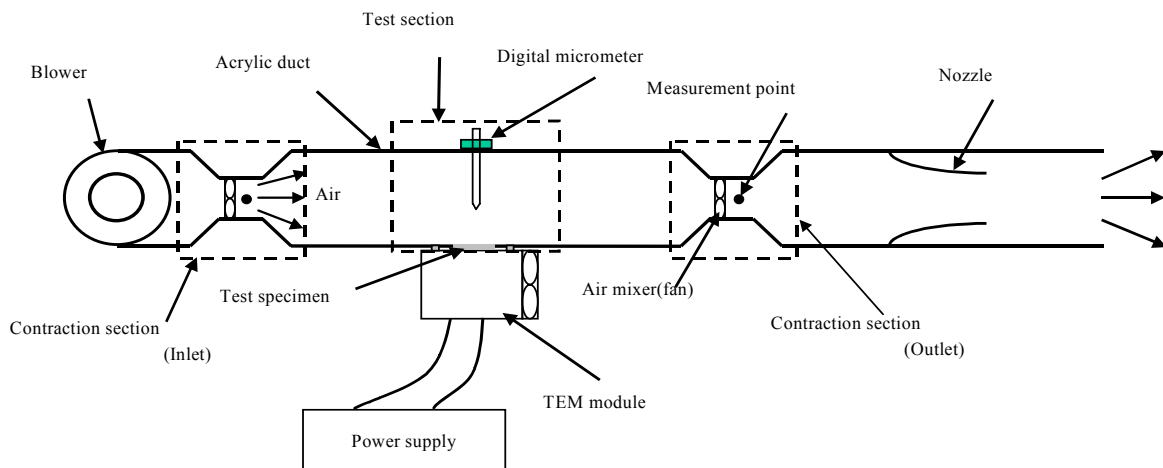


Fig. 1 Experimental apparatus.

온도를 정확하게 측정하기 위하여 유로를 100 mm에서 30 mm로 축소한 후 무동력 팬을 설치하여 공기를 혼합하였다. 냉각부는 크기 50 mm×50 mm, 전력 150 W인 열전소자와 지름 110 mm의 방열용 팬, 그리고 열전소자의 냉각면과 방열부의 온도를 표시하는 display panel로 구성되어 있다. 전원부는 열전소자 및 방열용 팬에 전원을 공급하기 위한 부분으로 DC power supply로 구성되어 있다.

2.2 착상 시편

열전도성 플라스틱의 착상 거동을 비교 분석하기 위하여 시험 시편은 기존의 금속 재료인 알루미늄과 강성이 뛰어나고 마모가 적은 PBT 계열의 열전도성 플라스틱, 그리고 PTFE 계열 3종을 준비하였다. PTFE 계열의 플라스틱 중의 첫 번째 시료는 가공용 PTFE로 화학적 비활성, 비점착성, 절연 안정성 등이 우수하다. 두 번째는 PTFE의 전도성을 보완하기 위하여 탄소 그래파이트(graphite) 25%를 혼합한 시료이다. 세 번째는 PTFE에 열적, 화학적 성질이 우수하고 제품 형상 유지에 필요한 기계적 성질을 가지며 상대적으로 높은 수분 흡수를 갖는 폴리이미드 5%와 탄성과 강도가 뛰어난 탄소섬유(carbon fiber) 10%를 혼합한 시료이다.

Fig. 2는 열전소자와 시험 시편, 그리고 덕트의 조립부를 도시한 것이며, 시험 시편의 크기는 지름 49.5 mm, 두께 1.0 mm로 표면을 매끄럽고 평평하게 가공하였다. Table 1은 실험에서 사용한 시편들의 물성치를 나타낸 것이다.

2.3 실험 방법

실험에 앞서 시험 시편을 열전소자의 냉각면에 부착시켰다. 이 때 열전소자의 냉각면과 시험 시편간의 열저항을 제거하고 완전 밀착시키기 위하여 냉각면에 thermal grease를 도포하였다. 열전소

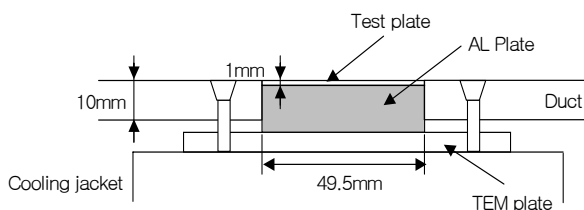


Fig. 2 Schematic diagram of TEM and test plate.

Table 1 Properties of test specimens

Item	Unit	Al.	PBT	PTFE		
				PTFE	CG* 25%	CF** 10%, PI*** 5%
Specific gravity		1.69	1.69	2.168	2.08	2.07
Contact angle(static)	°	75	82	95	96	97
Thermal conductivity	W/m°C	220	1.5	0.24	0.72	0.47

* CG : Carbon graphite, ** CF : Carbon fiber

*** PI : Polyimide

Table 2 Experimental conditions

Experimental condition	Value
Air velocity	1.3 m/s
Air temperature	10°C
Air humidity	0.006628 kg _w /kg _a
Cooling temperature(TEM)	-28°C

자의 냉각면 온도가 정상상태에 도달하기 전에 시편에 착상이 되는 것을 방지하기 위하여 시험 시편의 표면에 비닐 랩(vinyl wrap)을 씌웠다. 시험부 입구의 온·습도 및 냉각면 온도가 정상상태에 도달하면 비닐 랩을 제거하고 180분의 착상 실험을 진행하였고, 실험 조건은 Table 2와 같다.

서리층의 두께는 시험부의 윗면에 가공한 구멍에 micrometer의 탐침을 삽입하여 측정하였다. 이때 탐침에 의하여 표면에 생성된 서리가 녹는 것을 방지하기 위하여 탐침은 실험 중에 -18°C인 냉동실에 보관하며, 탐침의 끝부분에 검은 색을 칠하여 탐침과 서리 표면과의 구분을 용이하게 하였다. 서리층 두께의 측정은 초기 60분 동안은 매 15분마다 측정하였으며, 이 후에는 매 30분마다 측정하였다.

시편에 생성된 착상량은 시험 시편을 떼어낸 후 0.0001 g까지 측정 가능한 정밀 전자저울을 사용하여 측정하였다. 측정한 서리층 두께 및 착상량으로부터 생성된 서리의 평균 밀도는 다음과 같이 계산하였다.

$$\rho_f = \frac{m_f}{Ax_f} \quad (1)$$

시험 시편을 통한 열전달량은 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \dot{m}_a c_{p,a} (T_{a,in} - T_{a,out}) + \dot{m}_a h_{sv} \times (w_{a,in} - w_{a,out}) \quad (2)$$

여기서, 공기 유량, 공기측 입·출구 온도, 입·출구 절대 습도는 실험으로부터 측정된 값이다.

공기 유량은 순환부에 설치한 인버터가 부착된 송풍기의 회전수를 조절하여 시험 조건으로 설정하였으며, 유동 노즐의 차압에 의하여 측정하였다. 공기측 입·출구의 온도와 습도는 유로 축소부(contraction section)에서 각각 T형 열전대와 습도 센서를 사용하여 측정하였으며, 측정 위치 앞에 무동력 쉐어(air mixer)를 장착하여 온도와 습도를 균일하게 혼합하였다. 또한 정확한 온도의 측정을 위하여 입·출구의 측정점에는 각각 4개의 열전대로 이루어진 격자를 설치하였다. 실험과 관련된 데이터는 10초마다 데이터 기록계(DR-230)와 PC를 이용하여 기록 및 저장하였다. 실험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 각 시편에 대해서 5회씩 반복 실험을 수행하여 그 평균값을 결과로써 제시하였다.

본 연구에서 사용된 데이터와 결과들의 불확실도는 Kline and McClintock⁽¹⁰⁾의 불확실성 해석 방법에 근거하여 계산하였다. 반복 실험에 의하여 얻어진 불확실도는 서리층 두께 5.66%, 서리 평균 밀도 7.55%, 그리고 열전달량 2.77%이었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 착상을 수반하는 열교환기에 대한 열전도성 플라스틱 소재의 적용성과 착상 거동 특성을 파악하기 위해 PBT 계열의 열전도성 플라스틱과 PTFE 계열의 플라스틱 3종류 그리고 알루미늄 시편에 대하여 착상 실험 3시간 동안 실시하였다.

3.1 서리층 성장 거동

Fig. 3은 착상 시편별 시간에 따른 서리층 두께 성장을 도시한 것이다. 5개의 착상 시편 중에서 가공용 PTFE를 제외한 나머지 4개의 시편의 서

리 두께 성장 거동은 유사한 것으로 나타났다. 이러한 원인으로서는 착상 시편의 두께가 1.0 mm로 매우 얇으므로, 재질 변화에 따른 열전도 계수의 영향이 비교적 작기 때문이라고 판단된다. 이 중에서 표면 온도가 거의 동일한 알루미늄과 PBT를 비교하면 친수성 소재인 알루미늄보다는 표면 접촉각이 다소 큰 PBT의 서리층 성장이 다소 빠르다. 그리고 표면 온도와 접촉각이 거의 동일한 PTFE 계열의 두 혼합 소재는 서리층 성장 속도가 거의 동일하였다. 그러나, 가장 낮은 열전도 계수를 갖고 있는 가공용 PTFE의 경우에는 기타의 시료에 비하여 시편의 표면 온도가 상대적으로 높기 때문에 서리층 두께의 성장 속도가 가장 늦었다. 이를 확인하기 위하여 각각의 착상 시편에 열전대를 부착하여 착상 초기 시편의 표면 온도를 측정하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

Fig. 4는 착상 시편별 시간에 따른 서리층 밀도의 변화를 도시한 것이다. 일반적으로 냉각면의 온도가 높을수록 서리 밀도는 크다. Table 3에서 확인한 바와 같이 표면 온도가 가장 높은 PTFE의 서리 밀도가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 한편, 나머지 4개의 시료 중에서 표면 온도가 가장 낮은 알루미늄의 밀도가 오히려 다른 PTFE 계열 및 PBT 시편의 밀도보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 알루미늄의 접촉각은 약 70°이고, 다른 플라

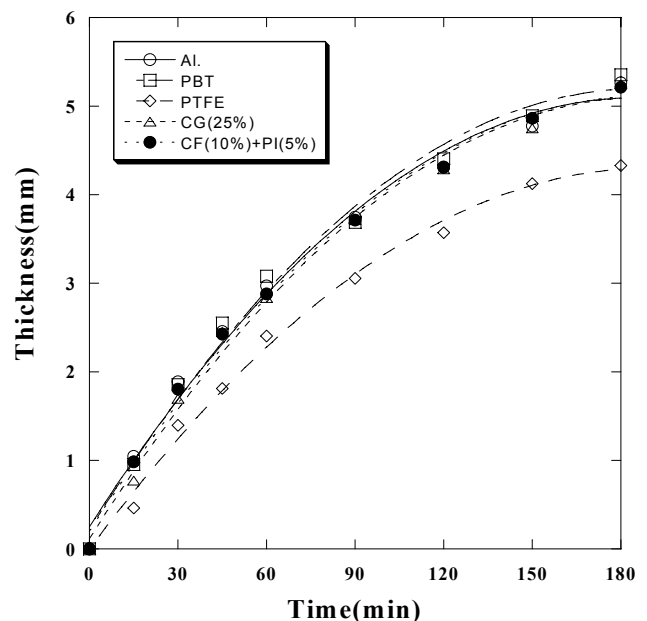


Fig. 3 Temporal variations of frost thickness with different test specimens.

Table 3 Initial frosting surface temperature of test specimens

Specimen	Al.	PBT	PTFE		
			PTFE	CG* 25%	CF** 10%, PI*** 5%
Surface temp.(°C)	-26.6	-26.5	-24.5	-25.9	-25.9

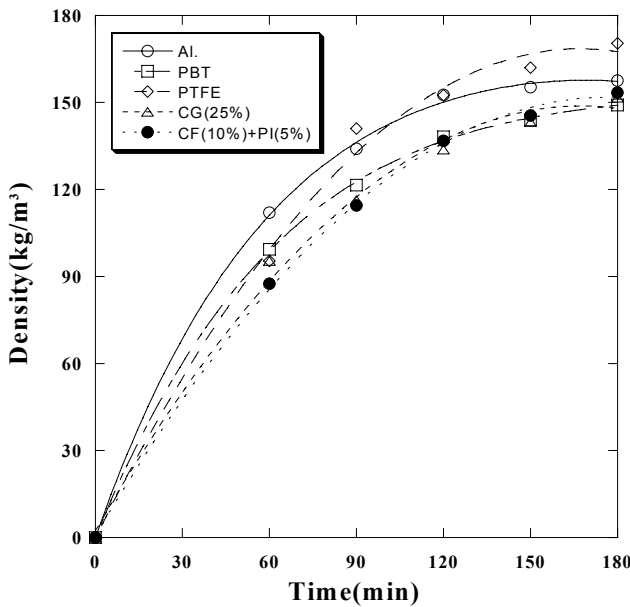


Fig. 4 Temporal variations of frost density with different test specimens.

스틱 시편의 접촉각은 약 95도로 접촉각 차이에 따라 생성된 서리 밀도의 차이가 난 것으로 판단된다⁽¹⁾. PBT는 알루미늄보다 접촉각이 크므로 밀도가 작고, 다른 PTFE보다는 접촉각이 작지만 표면 온도가 낮아서 서리 밀도는 비슷한 값을 보이고 있다.

3.2 결 및 물질전달

Fig. 5는 시간에 따른 시험 시편별 열전달의 변화를 도시한 것이다. 초기 열전달량은 표면 온도가 낮은 알루미늄과 PBT가 가장 많으며, PTFE의 열전달량이 가장 작았다. 그러나 착상이 진행됨에 따라 상대적으로 서리층 성장이 느렸던 PTFE의 열전달 감소폭은 적는데 반하여 다른 시편들은 착상이 비교적 빠르게 진행되어 표면 온도가 높아짐으로써 120분 이후에는 PTFE의 열전달량

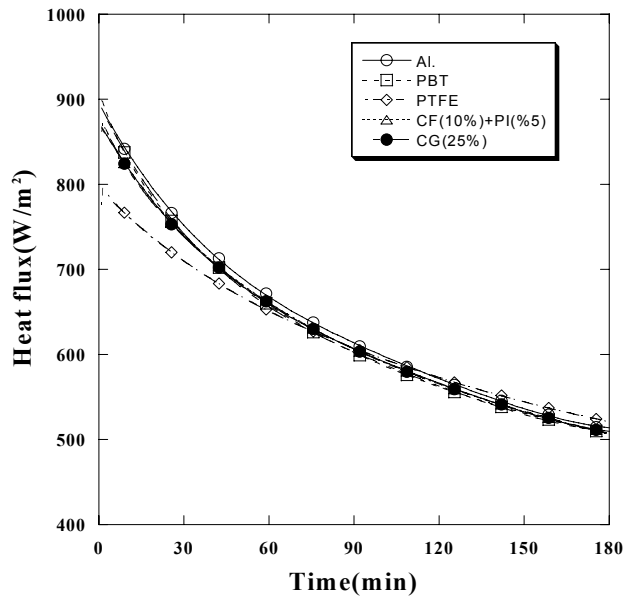


Fig. 5 Temporal variations of heat transfer with different test specimens.

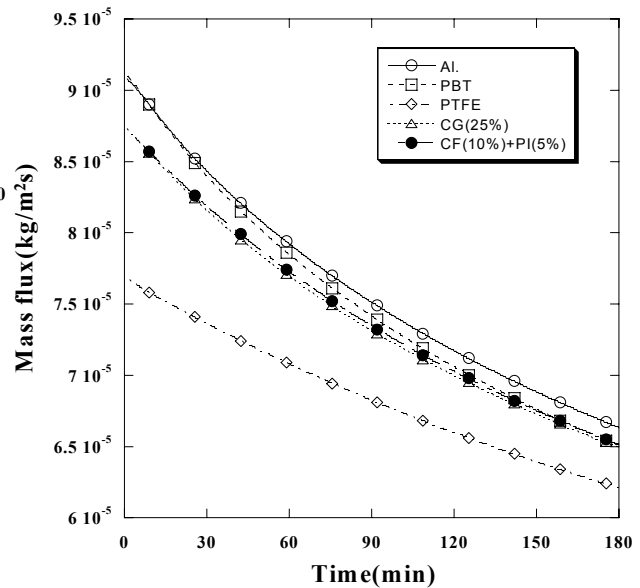


Fig. 6 Temporal variations of mass transfer with different test specimens.

이 오히려 많지만, 그 차이는 3% 미만으로 매우 작았다.

Fig. 6은 시험 시편별 물질전달의 변화를 도시한 것이다. 착상 초기에는 시편의 표면 온도가 가장 높은 PTFE의 물질전달량이 가장 적으며, 표면 온도가 가장 낮은 알루미늄과 PBT의 물질전달량이 가장 크다. PBT는 착상 초기에 알루미늄과 비슷한 물질전달량을 보이지만 생성되는 서리의 밀도가 상대적으로 작기 때문에 시간이 경과

할수록 PTFE 계열의 혼합 소재와 비슷한 값을 나타내었다. PTFE는 다른 소재와 비교할 때 서리 두께보다는 서리 밀도의 성장률이 더 크므로 시간 경과에 따른 물질전달량의 감소폭이 작았다.

4. 결 론

본 연구에서는 PBT 계열의 열전도성 플라스틱과 PTFE 계열의 플라스틱 그리고 알루미늄 시편에 대해 착상 실험을 수행하여 재질별 착상 거동 특성을 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 두께가 얇은 플라스틱 표면의 착상 거동은 알루미늄과 유사한 특성을 보인다.
- (2) 서리층 성장 거동은 재질의 열전도 계수에 따른 표면 온도와 표면의 특성에 영향을 받는다.
- (3) 열전도성 플라스틱의 열 및 물질전달량은 알루미늄 표면과 큰 차이가 없다.

참고문헌

- (1) Jhee, S., Lee, K. S. and Kim, W. S., 2002, "Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, No. 8, pp. 1047~1053.
- (2) Tsuda, Y. and Iwamoto, A., 1992, "Anti-frosting heat exchanger", *National Technical Report*, Vol. 38, No. 1, pp. 108~113.
- (3) Wang, C. C. and Chang, C. T., 1998, "Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers with and without hydrophilic coating", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 20, pp. 3109~3120.
- (4) Östin, R. and Johannesson, G., 1991, "A polymetric approach to counteract frosting in air-to-air heat exchanger", *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 11, No. 5, pp. 15~421.
- (5) O'Neal, D. L., Bryant, J. A., and Parker, B., 1997, "Impact of hydrophobic coating on the frost buildup and defrost performance of a heat pump evaporator", *45th Oji International Seminar*, pp. 181~187.
- (6) Hetsroni, G. and Mosyak, A., 1994, "Heat transfer and pressure drop in a plastic heat exchanger with triangular channels", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 33, pp. 91~100.
- (7) Bigg, D. M., Stickford, G. H., and Talbert, S. C., 1989, "Applications of polymeric materials for condensing heat exchangers", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29, No. 16, pp. 1111~1116.
- (8) Jachuck, R. and Ramshaw, C., 1994, "Process intensification : Polymer film compact heat exchanger(PFCHE)", *Trans. IChemE*, Vol. 72, Part A, pp. 255~262.
- (9) Patel, A. B. and Brisson, J. G., 2000, "Design, construction, and performance of plastic heat exchanger for sub-Kelvin use", *Cryogenics*, Vol. 40, pp. 91~98.
- (10) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing uncertainties in single-sample experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.