

## 열전도성 플라스틱 평판에서의 착상거동

이 장 석, 이 관 수<sup>\*†</sup>

한양대학교 대학원 기계공학과, \*한양대학교 기계공학부

### Frosting Behavior on the Plate of Thermally Conductive Plastic

Jang-Seok Lee, Kwan-Soo Lee<sup>\*†</sup>

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 9, 2004; revision received June 3, 2004)

**ABSTRACT:** An experimental study has been carried out to investigate the frosting behavior on the plate of thermally conductive plastic (PBT based resin) by comparing it with those of aluminum and some plastic test specimens (PTFE based resin). It is found that the frosting behavior of plastic specimens with 1 mm thickness shows similar trend to that of aluminum except PTFE. The properties of frost formed on the specimens are found to be affected by both thermal conductivity and surface characteristics of the materials. The results indicate that the heat and mass transfer rates of PBT resin are almost equivalent to those of aluminum.

**Key words:** Frosting behavior(착상거동), Thermally conductive plastic(열전도성 플라스틱), PBT (폴리부틸렌 테레프탈레이트), PTFE(폴리테트라플루오로에틸렌), Heat and mass transfer(열 및 물질전달)

#### 기 호 설 명

$A$  : 시험 표면적 [ $m^2$ ]  
 $c_p$  : 정압비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]  
 $h_{sv}$  : 승화잠열 [ $kJ/kg$ ]  
 $k$  : 열전도계수 [ $W/m \cdot K$ ]  
 $m_f$  : 착상량 [ $kg$ ]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $kg/s$ ]  
 $Q$  : 열전달량 [ $W$ ]  
 $T$  : 온도 [ $K$ ]  
 $t$  : 시간 [ $min$ ]  
 $u$  : 유속 [ $m/s$ ]

$w$  : 절대습도 [ $kg_w/kg_a$ ]

$x_f$  : 두께 [ $mm$ ]

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

#### 하첨자

$a$  : 공기층

$in$  : 입구

$out$  : 출구

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2290-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

#### 1. 서 론

생활수준의 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 대해서는 형상 및 소재에 대하여 폭넓게 연구 개발되고 있다. 열교환기의 주요 연구목적은 열전달면적과 열전달계수를 증가시키고 열저항을 감소시켜 성능을 향상시키는 한편 가능한 한 원가를 절감하는데 있다. 대표적으로 현재 사용되고 있는 열교환기는 열전도성, 가공성, 내압성, 내구성 등을 고려한 금속제 환-관 열교환기가 주종을 이루고 있다.

열교환기의 소재와 관련된 연구로는 크게 금속 재료 열교환기의 표면처리를 통하여 목적하는 특성을 구현하는 분야<sup>(1-5)</sup>와 소재를 비금속 재료인 플라스틱을 사용하여 원가절감 및 기능성을 추구하는 분야<sup>(6-9)</sup>로 나눌 수 있다. 금속이 아닌 플라스틱을 열교환기 재료로 사용할 경우, 산업계에서 문제시되고 있는 부식에 대응할 수 있으며, 경량화가 가능하고 금속에 비해 상대적으로 낮은 재료비와 가공비를 고려할 때 경쟁력이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 낮은 열전도계수 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<sup>2</sup>C의 계수를 갖는 열전도성 플라스틱들이 개발되고 있다.

따라서 본 연구에서는 착상을 수반하는 열교환기에 대한 플라스틱의 적용성과 착상거동 특성을 파악하기 위해 PBT(polybutylene terephthalate) 계열의 열전도성 플라스틱과 PTFE(polytetrafluorethylene) 계열의 플라스틱, 그리고 알루미늄 시

편에 대해 착상실험을 수행하여 재질별 착상거동 특성을 조사한다. 이를 통하여 열전도성 플라스틱 수지의 열교환기 적용을 위한 기본적인 자료를 확보하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

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

항온항습실에서 시험조건으로 조절된 공기는 시험부로 유입된다. 시험부로 유입되는 공기는 순환부에 장착된 송풍기에 의해 유량이 조절되며, 시험부 입·출구에 flow straightener를 삽입하여 공기의 유동을 균일하게 하였다. 시험부는 아크릴판으로 제작하였으며, 공기유로의 높이는 100 mm이다. 시험시편의 두께는 기존의 열교환기의 관두께와 냉매의 침투성(permeation)을 고려하여 1.0 mm로 하였고, 시험부 입·출구에는 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 표시하

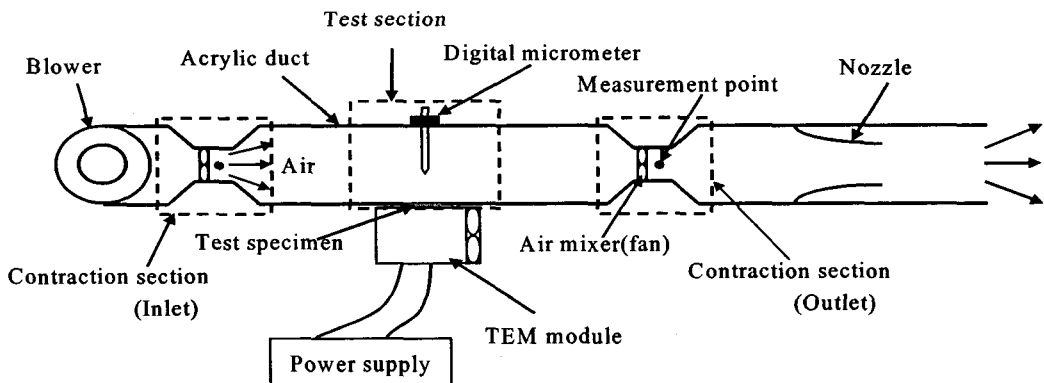


Fig. 1 Experimental apparatus.

는 display panel로 구성되어 있다. 전원부는 열전소자 및 방열용 팬에 전원을 공급하기 위한 부분으로 DC power supply로 구성되어 있다.

2.2 착상시편

열전도성 플라스틱의 착상거동을 비교 분석하기 위하여 시험시편은 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 그라파이트(graphite) 25%를 혼합한 시료이다. 세 번째는 PTFE에 열적, 화학적 성질이 우수하고 제품형상유지에 필요한 기계적 성질을 가지며 상대적으로 높은 수분흡수를 갖는 폴리이미드 5%와 탄소와 강도가 뛰어난 탄소섬유(carbon fiber) 10%를 혼합한 시료이다.

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

2.3 실험방법

실험에 앞서 시험시편을 열전소자의 냉각면에

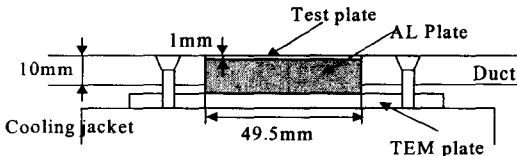


Fig. 2 Schematic diagram of TEM and test plate.

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)	°	72	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 <sub>w</sub> /kg <sub>a</sub>
Cooling temperature (TEM)	-28°C

부착시켰다. 이때 열전소자의 냉각면과 시험시편 간의 열저항을 제거하고 완전 밀착시키기 위하여 냉각면에 thermal grease를 도포하였다. 또한 냉각면 표면의 온도를 측정 및 점검하기 위하여 열전대를 열전소자 표면의 중앙에 부착하였다. 열전소자의 냉각면 온도가 정상상태에 도달하기 전에 시편에 착상이 되는 것을 방지하기 위하여 시험시편의 표면에 비닐 랩(vinyl wrap)을 씌웠다. 시험부 입구의 온·습도 및 냉각면 온도가 정상상태에 도달하면 비닐 랩을 제거하고 180분의 착상 실험을 진행하였고, 실험조건은 Table 2와 같다.

서리층 두께는 시험부의 뒷면에 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 검은색을 칠하여 탐침과 서리 표면과의 구분을 용이하게 하였다. 서리층 두께의 측정은 초기 60분 동안은 매 15분마다 측정하였으며, 이후에는 매 30분마다 측정하였다.

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

$$\rho_f = \frac{m_f}{Ax_f} \tag{1}$$

시험시편을 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 공기유량, 공기측 입·출구 온도, 입·출구 절대습도는 실험으로부터 측정된 값이다.

착상물은 덕트 입·출구에 장착한 습도센서의 on-line 측정에 의하여 데이터를 얻고, 이를 30분 간격으로 측정된 착상량과 비교하여 최종적으로 실험결과를 보정하였다.

공기유량은 순환부에 설치한 인버터가 부착된 송풍기의 회전수를 조절하여 시험조건으로 설정하였으며, 유동노즐의 차압에 의하여 측정하였다. 공기측 입·출구의 온도와 습도는 유로 축소부(contraction section)에서 각각 T형 열전대와 습도센서를 사용하여 측정하였으며, 측정위치 앞에 무동력 헨(air mixer)을 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. 실험결과의 신뢰성을 높이기 위해 각 시편에 대해서 5회씩 반복 실험을 수행하여 그 평균값을 결과로써 제시하였다.

본 연구에서 사용된 데이터와 결과들의 불확실도는 Kline and McClintock<sup>(10)</sup>의 불확실성 해석 방법에 근거하여 계산하였다. 반복 실험에 의하여 얻어진 불확실도는 서리층 두께 5.66%, 서리 평균 밀도 7.55%, 공기유량 1.32%, 그리고 열전달량 2.77%이었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 착상을 수반하는 열교환기에 대한 열전도성 플라스틱 소재의 적용성과 착상거동

특성을 파악하기 위해 PBT 계열의 열전도성 플라스틱과 PTFE 계열의 플라스틱 3종류, 그리고 알루미늄 시편에 대하여 착상실험 3시간 동안 실시하였다.

3.1 서리층 성장거동

Fig. 3은 착상시편별 시간에 따른 서리층 두께 성장을 도시한 것이다. 5개의 착상시편 중에서 가공용 PTFE를 제외한 나머지 4개의 시편의 서리 두께 성장거동은 유사한 것으로 나타났다. 이러한 원인으로는 착상시편의 두께가 1.0 mm로 매우 얇으므로, 재질변화에 따른 열전도계수의 영향이 비교적 작기 때문이라고 판단된다. 이 중에서 표면온도가 거의 동일한 알루미늄과 PBT를 비교하면 친수성 소재인 알루미늄보다는 표면접촉각이 다소 큰 PBT의 서리층 성장이 다소 빠르다. 그리고 표면온도와 접촉각이 거의 동일한 PTFE 계열의 두 혼합 소재는 서리층 성장속도가 거의 동일하였다. 그러나, 가장 낮은 열전도계수를 갖고 있는 가공용 PTFE의 경우에는 기타의 시료

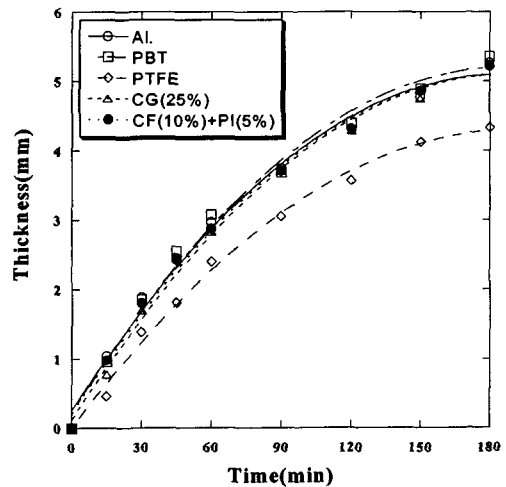


Fig. 3 Temporal variations of frost thickness with different test specimens.

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

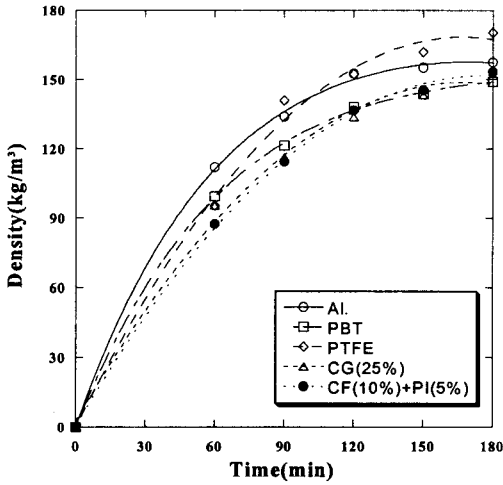


Fig. 4 Temporal variations of frost density with different test specimens.

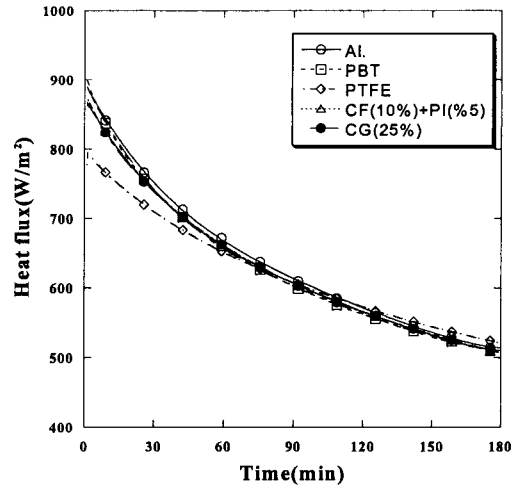


Fig. 5 Temporal variations of heat transfer with different test specimens.

에 비하여 시편의 표면온도가 상대적으로 높기 때문에 서리층 두께의 성장속도가 가장 늦었다. 이를 확인하기 위하여 각각의 착상시편 표면의 증상에 열전대를 부착하여 착상 초기 시편온도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

Fig. 4는 착상시편별 시간에 따른 서리층 밀도의 변화를 도시한 것이다. 일반적으로 냉각면의 온도가 높을수록 서리밀도는 크다. Table 3에서 확인한 바와 같이 표면온도가 가장 높은 PTFE의 서리밀도가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 한편, 나머지 4개의 시료 중에서 표면온도가 가장 낮은 알루미늄의 밀도가 오히려 다른 PTFE 계열 및 PBT 시편의 밀도보다 큰 값을 보이고 있다. 이는 알루미늄의 접촉각은 약 72°이고, 다른 플라스틱 시편의 접촉각은 약 95°로 접촉각 차이에 따라 생성되는 서리의 밀도가 차이가 난 것으로 판단된다.<sup>(1)</sup> PBT는 알루미늄보다 접촉각이 크므로 밀도가 작고, 다른 PTFE보다는 접촉각이 작지만 표면온도가 낮아서 서리밀도는 비슷한 값을 보이고 있다.

### 3.2 열 및 물질전달

Fig. 5는 시간에 따른 시험시편별 열전달의 변화를 도시한 것이다. 초기 열전달량은 표면온도가 낮은 알루미늄과 PBT가 가장 많으며, PTFE의 열전달량이 가장 작았다. 그러나 착상이 진행됨

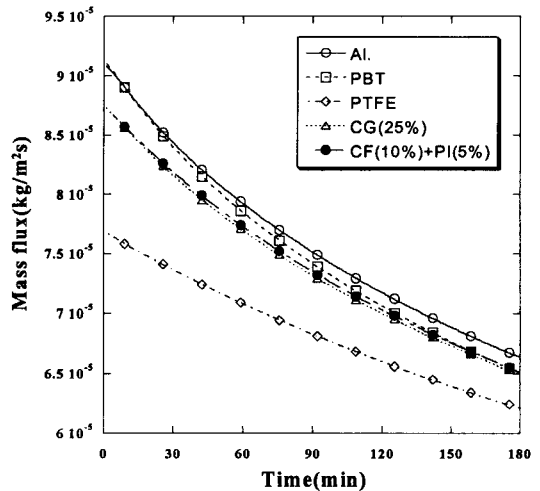


Fig. 6 Temporal variations of mass transfer with different test specimens.

에 따라 상대적으로 서리층 성장이 느렸던 PTFE의 열전달 감소폭은 적는데 반하여, 다른 시편들은 착상이 비교적 빠르게 진행되어 표면온도가 높아짐으로써 120분 이후에는 PTFE의 열전달량이 오히려 많지만 그 차이는 3% 미만으로 매우 작았다.

Fig. 6은 시험시편별 물질전달의 변화를 도시한 것이다. 착상 초기에는 시편의 표면온도가 가장 높은 PTFE의 물질전달량이 가장 적으며, 표면온

도가 가장 낮은 알루미늄과 PBT의 물질전달량이 가장 크다. PBT는 착상 초기에 알루미늄과 비슷한 물질전달량을 보이지만 생성되는 서리의 밀도가 상대적으로 작기 때문에 시간이 경과할수록 PTFE 계열의 혼합 소재와 비슷한 값을 나타내었다. PTFE는 다른 소재와 비교할 때 서리두께보다는 서리밀도의 성장률이 더 크므로 시간경과에 따른 물질전달량의 감소폭이 작았다.

#### 4. 결 론

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

(1) 두께가 얇은 플라스틱 표면의 착상거동은 알루미늄과 유사한 특성을 보인다.

(2) 서리층 성장거동은 재질의 열전도계수에 따른 표면온도와 표면의 특성에 영향을 받는다.

(3) 열전도성 플라스틱의 열 및 물질전달량은 알루미늄과 큰 차이가 없다.

#### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터(iDOT)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 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.
- Tsuda, Y. and Iwamoto, A., 1992, Antifrosting heat exchanger, *National Technical Report*, Vol. 38, No. 1, pp. 108-113.
- 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.
- Östlin, R. and Johannesson, G., 1991, A polymeric approach to counteract frosting in air-to-air heat exchanger, *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 11, No. 5, pp. 15-421.
- 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.
- 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.
- 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.
- Jachuck, R. and Ramshaw, C., 1994, Process intensification: Polymer film compact heat exchanger (PFCHE), *Trans. IChemE*, Vol. 72, Part A, pp. 255-262.
- 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.
- Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3-8.