

광학적 기법에 의한 Frost 두께 측정방법의 개발

정재홍* · 윤상열** · 김경천***

Development of Frost Thickness Measurement Method Using Optical Technique

Jae hong Jeong, Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

Key Words : Frost(성애), Thickness(두께), Mapping function(사상함수), Calibration image(척도이미지), Temperature Electric Cooler(전자냉각장치), Cooling circuit(냉각장치)

Abstract

A new non-contact method of the frost thickness measurement has been developed. The method is based on the digital image processing technique to identify the reflection edge of the image captured by a CCD camera under laser sheet light illumination. To insure the accuracy of frost layer thickness, an in-situ calibration procedure is carried out with a calibration target with 0.5mm holes. Using the mapping function obtained by the calibration procedure, the contour of frost surface can be estimated with sub-pixel resolutions. The developed method is applied to study the effect of cooling plate temperature on the frost thickness in a small low speed wind tunnel.

1. 서론

냉동공조장치에 주로 사용되는 열교환기에서 발생하는 frost 는 열교환기의 성능과 밀접한 관계가 있기 때문에 이전부터 frost 의 형성과 관련된 이론 및 실험적 연구가 많이 수행되어져 왔다.⁽¹⁾

주위 조건에 따른 frost 와 관련된 기본적인 성질 및 특성들로는 frost 의 두께, 밀도, 열전도도가 있다. 그리고 열교환기인 경우에는 압력 강하까지 고려되어야 한다. 그리고 주위 조건에 따른 frost 의 내부 구조 및 성장을 관찰할 수 있는 가시화도 중요한 실험으로 들 수 있다. 본 실험에서는 평판의 온도에 따른 frost 의 두께 측정 방법을 제시하고자 한다.

과거의 논문을 살펴보면 frost 의 높이를 측정하는 방법을 크게 접촉식⁽²⁾⁽³⁾ 과 비접촉식⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾으로 나눌 수 있다. 접촉식은 일정한 절대 높이에서

frost 의 면에 길이 측정 장치를 내려 높이를 측정하는 방법이다. 접촉식에 주로 사용하는 측정 장치로는 micrometer⁽²⁾⁽³⁾, dial gauge, cathetometer 등을 사용하여 측정하였다. 접촉식의 단점은 frost 의 표면이 온도에 아주 민감하게 반응하기 때문에 측정 장치가 frost 의 표면의 근처에 도달하면 frost 가 녹는 현상이 발생하기 때문에 측정하기가 매우 어렵다. 그러나 비접촉식은 광원을 이용하기 때문에 frost 의 표면에 주는 영향을 최소화 하고 CCD 카메라를 이용하기 때문에 이미지 획득이 빠르고 쉽게 이루어진다. 본 실험에서는 냉각 평판에 성장하는 frost 의 두께를 측정하기 위해서 광학적인 방법을 이용했다. 과거의 논문에서는 CCD 카메라의 이미지 평면에 평행하게 성장하는 frost 의 성장에 대해서 측정하였다.⁽⁴⁾ 그러나 본 실험에서 사용하는 방법은 CCD 카메라로 이미지 획득한 후 mapping function 을 이용해서 CCD 카메라의 이미지 평면에 관계없이 frost 의 두께를 측정하고자 한다.

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 대학원 기계공학과

*** 부산대학교 기계공학부

2. 실험장치 및 조건

2.1 풍동

Frost 두께 측정 실험에 사용된 풍동은 Open 형태이다. 그리고 풍동은 송풍기, 정체실, 수축부, 시험부, 확대부로 나눌 수 있다. 송풍기의 사양은 220V/35W/2.7m²/min/25mmAq 이다. 그리고 전압을 조절해서 풍동 내부의 속도를 1m/s~4m/s 까지 변화시킬 수 있다. 송풍기에서 나오는 유질을 고르게 하기 위해서 Mesh 를 송풍구 출구, 정체실의 입구와 출구에 설치하였다. 수축부는 3 차원으로 설계하여 박리가 발생하지 않도록 만들어졌으며 시험구간에서 완전 발달된 유동(fully developed flow)을 만들기 위해서 풍동 길이를 충분히 길게 만들었으며 시험부의 위치는 수축부의 끝부분으로부터 하류 방향으로 약 700mm 이다. 시험부의 단면은 2.5cm×2.5cm 이다. Fig. 1 은 실험에 사용된 풍동의 개략도이다.

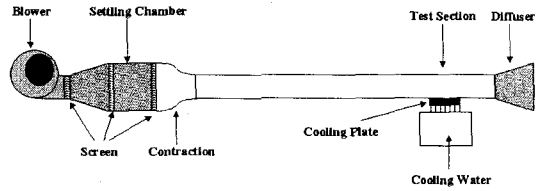


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel

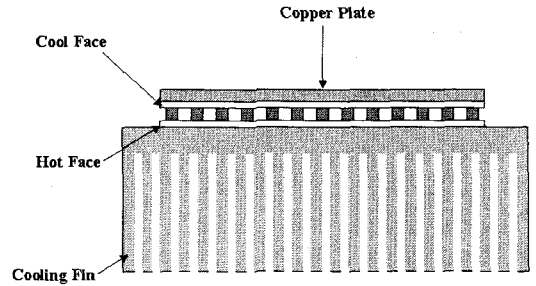


Fig. 2 Schematic diagram of cooling circuit

2.2 냉각 장치

실험에서 사용된 냉각 장치(Cooling Circuit)는 서로 다른 두 도체의 접점을 통해 전류를 흘리면 접점 부위에서 흡열과 발열이 가역적으로 일어나는 현상(Peltier Effect)을 이용한 Temperature Electric Cooler (TEC)을 사용하였다.

TEC 의 성능, 즉 발열 및 냉각은 TEC 에 가해지는 전압과 전류에 의해 결정된다. 사용된 TEC 는 전압은 최대 6V, 전류는 최대 6A 이다. 이론적으로는 TEC 의 냉각부에서 최대 낼 수 있는 온도는 -40 °C 이하이다. TEC 의 특성상 한면이 차가워지면 다른 한면은 뜨거워 지게 된다. 그런데 뜨거워진 한면을 충분히 냉각시키지 않으면 뜨거워진 면의 열이 차가운 면으로 이동하기 때문에 냉각면의 온도를 충분히 내릴 수가 없게 된다. 따라서 뜨거워진 면에 냉각핀을 달아 물 또는 팬으로 냉각을 시켜야 한다. 팬(공랭식)으로 냉각 시킬 경우 주위 온도의 영향을 많이 받기 때문에 약 -10 ~ -15°C 정도 낮출 수 있다. -20 °C 이하로 낮추기 위해서는 물(수냉식)로 하는 것이 효과가 더 크다. Fig. 2 은 실험할 TEC 의 양면에 구리판과 냉각핀을 설치한 장치도이다.

2.3 기타 실험장비

Frost 두께 측정 실험의 위해 사용된 실험장비

Table 1 Test condition

	Condition
Air temperature (T_{air})	20°C (293K)
Air humidity (W)	63%
Air Velocity (V_{air})	1.0 m/s
Plate temperature (T_c)	-3.0, -10.0, -20.0°C

는 풍동과 냉각 장치 외에 CCD 카메라(640×480 pixels), 냉각관(구리관, 40×40×2mm³), TEC 를 구동하기 위한 전원 공급장치, TEC 의 온도를 측정할 수 있는 data acquisition unit, 광원으로 사용될 argon laser, 광원의 방향 조절을 위한 mirror system 이 사용되었다. 그리고 이미지 calibration 을 위해 target 을 사용하였다. Target 내부에 있는 점들의 간격은 아래 위로 2.5mm 이다. 홀의 직경은 ϕ 0.5mm 이다. Fig. 3 은 실험에 사용된 target 사진이다.

2.4 실험 조건

본 실험에 사용된 풍동의 형태가 open 형태이기 때문에 풍동 입구에서의 조건을 조절할 수 없기 때문에 실험시의 실험실 온도와 습도를 측정하였

다. 공기의 속도는 hot wire 로 calibration 하여 풍동의 내부 속도가 $V_{max} = V_{air} = 1.0m/s$ 가 되도록 하였다. 평판의 온도는 세 가지에 대해서 측정하였다. 실험 조건을 정리하면 table 1 과 같다.

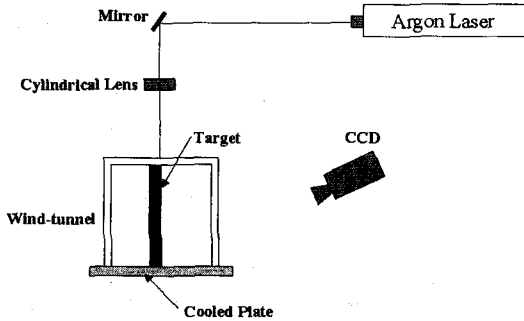


Fig. 3 Schematic diagram of measurement of frost height

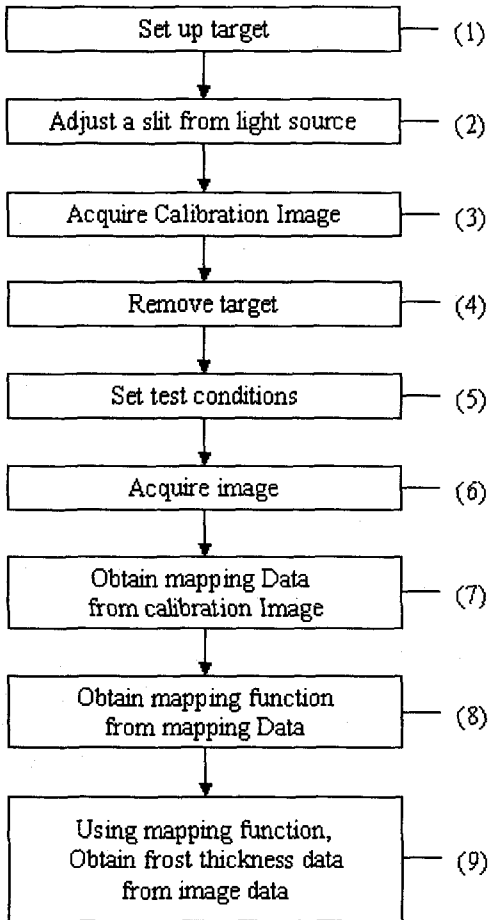


Fig. 4 Flow chart of experiment

3. 두께 측정 방법

3.1 두께 측정 방법

본 실험에서 사용된 방법은 비접촉식으로 argon laser 와 CCD 카메라를 이용하여 획득한 이미지로부터 mapping function 을 이용하여 frost 의 두께를 측정하고자 한다. 기본적인 실험 장치도는 Fig. 3 과 같다. 그리고 실험 순서는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4 에서 (2)의 과정에서 슬릿의 폭을 작게 만들면 측정하고자 하는 부분 바깥으로 빛이 나가지 않기 때문에 정확성을 높일 수가 있다. 본 실험에서 사용된 슬릿의 두께는 약 0.5mm 이다. 그리고 Fig. 4 에서 (2)의 과정은 레이저 슬릿이 target 의 면 전체를 스치고 지나갈 수 있게 해야 한다. 이 과정은 Target 의 점을 이용해서 mapping function 을 만들기 때문에 주의해야 하는 부분이다. Fig. 4 에서 (3)의 과정에서 점의 개수를 언급한 것은 mapping function 의 order 를 정하는 요소이기 때문이다. Mapping function 이 2 차인 경우에는 점의 수가 가로,세로 적어도 3 개 이상은 있어야 한다. Mapping function 의 order 가 증가 할수록 점의 수도 증가 해야 한다. 일반적으로 점의 수가 많으면 mapping function 의 신뢰성이 증가하게 된다. Fig. 4 에서 (3)의 과정은 mapping function 을 만들기 위한 calibration image 를 획득하는 과정이다. 일단 calibration image 를 획득한 후에는 CCD 카메라를 건드리거나 이동하지 않도록 주의하여야 한다. 만약 건드리거나 이동하면 (1)의 과정부터 실험을 다시 해야 한다. Fig. 5 는 실제 실험에서 calibration image 를 획득한 이미지이다. Target 내부에 있는 점들의 간격은 점의 중심을 기준으로 아래 위로 2.5mm 이다. 그리고 홀의 직경은 $\phi 0.5mm$ 이다. Fig. 4 에서 (6)의 과정에서 렌즈의 조리개를 최대한 줄여서 CCD 카메라에 들어오는 빛의 양을 최대한으로 줄인다. 그리고 이미지 획득 시에만 레이저를 노출시키고 이미지 획득이 한다. 이미지 획득이 끝나면 레이저를 차단시킨다. 다음 과정은 (3)의 과정에서 획득한 calibration image 를 이용해서 mapping function 을 구할 때 사용되는 mapping data 를 구하는 과정이다. Calibration image 로부터 mapping function 의 계수를 구하기 위한 데이터를 추출하기 위해서 calibration image 의 점들의 중심을 구한다. 점들의 중심을 구할 때 사용한 방법은 각각의 픽셀이 gray 값을 이용해서 중심을 구하는 방식을 사용하였다. Fig. 6 은 target 의 점에 대한 중심을 확대해서 나타낸 그림이다. 그림에는 pixel

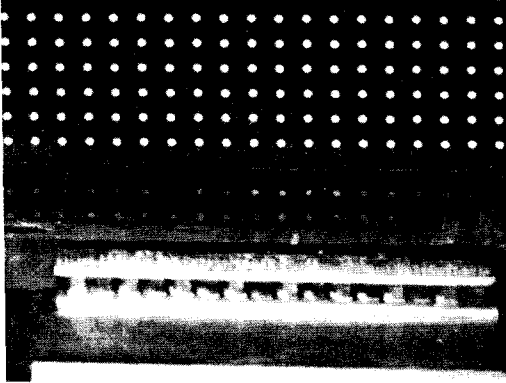


Fig. 5 Calibration Image

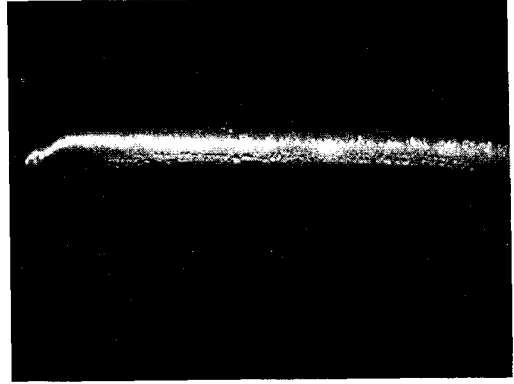


Fig. 7 Test image for frost thickness

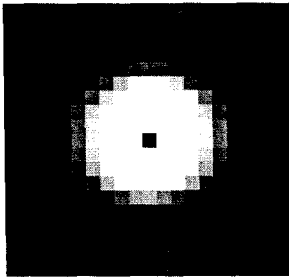


Fig. 6 Center of a point

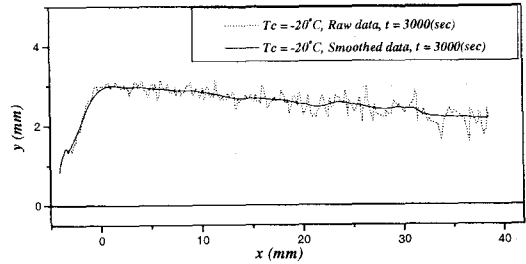


Fig. 8 Frost thickness from test image

값이므로 정수로 표현되어 있다. 그러나 실제 calibration image로부터 얻은 데이터는 sub-pixel 값으로 나타난다. Calibration image의 점들 중에서 명확하지 않거나 view size 때문에 잘려나간 점은 배제시킨다. 이 과정까지가 mapping function의 계수를 구하기 위한 calibration 데이터를 획득하는 과정이다. 본 연구에서 사용된 mapping function은 x 축, y 축으로 3 차식을 사용하였다. Mapping function은 다음과 같다.

$$FX(x, y) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 + a_6X^3 + a_7X^2Y + a_8XY^2 + a_9Y^3$$

$$FY(x, y) = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 + b_6X^3 + b_7X^2Y + b_8XY^2 + b_9Y^3$$

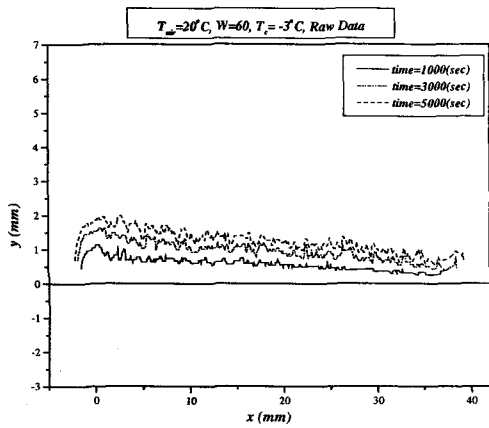
여기서 X, Y는 이미지상의 좌표를 나타내고 x, y는 실제 좌표를 나타낸다. Mapping function의 x, y 축에 대한 계수는 각각 9개이고 mapping function의 계수값을 구하는 기본적인 방식은 최소 자승법(the method of least squares)을 사용한다.

최소 자승법을 사용 구해진 mapping function을 실제 좌표와의 에러값을 비교해 본 결과 에러의 최대값이 약 0.1pixel이 나왔다. 따라서 mapping function에서 변환되어 나오는 값들은 매우 신뢰할 수 있다. 이렇게 구해진 mapping function을 이용해서 이미지 테스트를 수행하였다. 테스트에 사용된 이미지는 평판 온도가 -20°C이고 시간은 3000 초일 때의 이미지(Fig. 7)이다. 테스트 이미지에서 frost의 에지 부분은 pixel의 gray level을 사용하여 에지를 축축해서 에지 데이터를 만들었다. Fig. 8는 위의 이미지를 사용해서 mapping 결과를 나타내는 그림이다. 전체적으로 frost의 표면이 고르지 못함과 평판의 앞뒤 부분에서의 두께 차이를 잘 보여주고 있다.

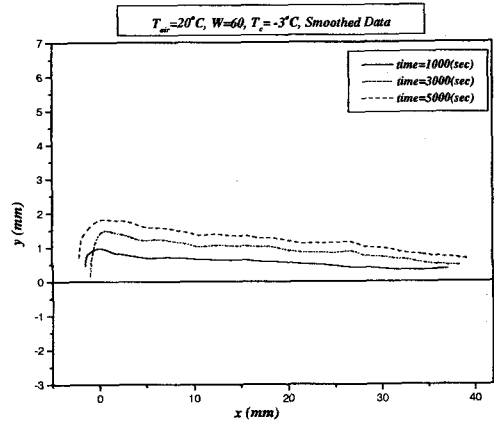
4. 실험 결과

4.1 Frost 두께 측정 결과

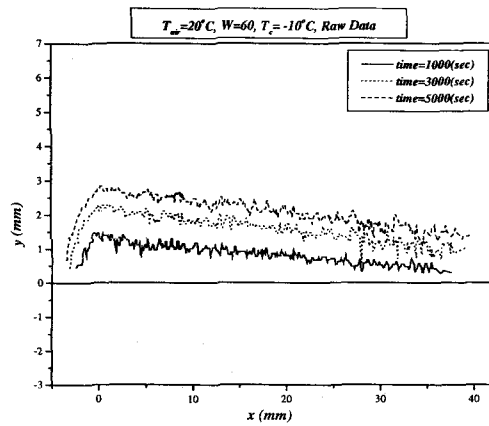
Frost의 두께를 측정은 냉각 평판온도가 -3, -10, -20°C에서 수행되었으며 이미지 획득 시간은 1000, 3000, 5000 초일 때이다.



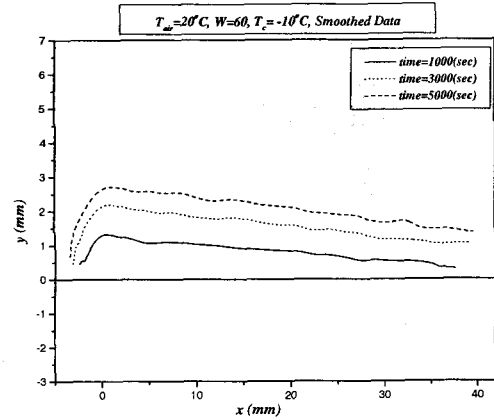
(a)



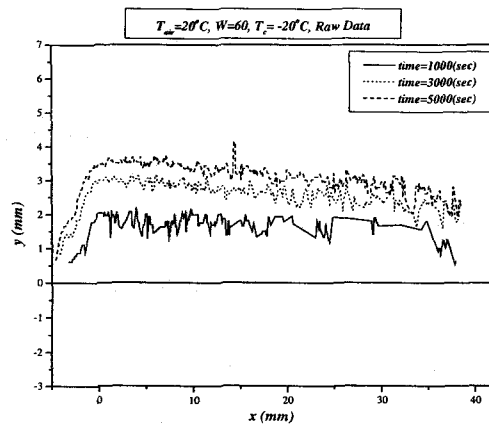
(b)



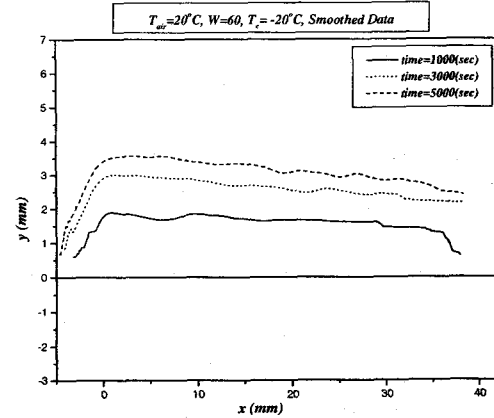
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 9 Result of frost thickness with mapping function
(raw data and smoothed data)

본 연구에 사용된 CCD 카메라로부터 획득된 이미지의 1pixel 당 약 74 μ m 정도의 해상도를 가진다. 따라서 frost 의 반사등을 고려한다고 해도 두께 오차가 $\pm 2 \sim \pm 3$ pixel 을 넘지 않는다. 본 연구에서 사용한 edge detecting 기법은 이미지 gray level 을 기준으로 추출하기 때문에 다소의 오차를 포함하고 있다. 그러나 두께 오차가 접촉식으로 측정하는 것 보다는 작을 것으로 판단된다.

Fig. 9 는 실험에서 획득된 이미지에서 frost 의 edge 를 추출하여 calibration image 로부터 calibration 한 mapping function 을 이용해서 실제 좌표계로 변환한 그림이다.

평판의 온도에 따라 측정된 frost 의 두께가 변화가 심한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9(a)(c)(e)는 평판의 온도에 따른 raw data 를 나타내고 있다. 평판의 온도가 낮을수록 초기에 frost 의 성장이 매우 빠르게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 온도가 낮을수록 성장이 빠르다는 것은 밀도가 낮을 확률이 높다는 것이다. 따라서 위의 데이터로 평판의 온도가 낮을수록 밀도가 낮아진다는 것을 예측할 수 있다. 평판의 온도가 낮아질수록 frost 의 표면의 fluctuation 이 매우 심해지는 것을 관찰할 수 있다. 이런 현상은 frost 의 성장 속도가 빠른 대신 광원에 반사되는 frost 의 분포가 낮기 때문이다. 이런 현상으로부터 frost 이 내부 구조가 porous 한 구조라는 것을 예측할 수 있다. 그리고 fig. 9(e)의 raw data 에서 평판의 뒷부분에 직선이 나타나는 이유는 그 부분의 frost 의 분포가 낮아 edge 가 추출되지 않았기 때문이다. 평판의 전체를 볼 때 평판의 앞부분이 뒷부분보다 frost 의 성장이 빠르다. Fig. 9(b)(d)(e)는 측정된 frost 의 두께 데이터에서 fluctuation 을 제거하고 평판에 대한 frost 두께의 전체적인 경향을 보기 위해서 smoothed 한 그림이다.

5. 결론

본 실험에서 사용된 광학적인 방법에 의한 frost 의 두께 측정은 접촉식에 비해 frost 에 영향을 적게 주고 정밀도도 view size 를 조절하여 높일 수 있다. 연구에서 사용된 CCD 카메라의 해상도를 고려한다면 1pixel 이 높은 해상도를 가진다. Frost 의 표면에서의 반사등을 고려한다고 해도 오차가 $\pm 1 \sim \pm 2$ pixel 을 넘지 않는다. 여기서의 오차는 접촉식으로 측정하는 것 보다는 작을 것으로 판단된다. 그리고 CCD 카메라의 렌즈 조리개를 최대한 줄여 frost 의 표면에서의 반사된 빛을 최대한 줄였

다. 따라서 frost 의 표면에서 반사에 의해 발생하는 어려운 우리가 예상되는 값보다는 훨씬 적게 나타날 것으로 판단된다. 그리고 획득된 이미지로부터 정도가 높은 edge detecting 기법을 적용한다면 해상도를 높일 수 있다. 그리고 frost 뿐만 아니라 정밀도를 요하는 여러 응용분야에 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국 21 핵심과제의 일부지원과 LG 전자(주)의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) D.L. O'Neal and D.R. Tree, 1985, "A review of frost formation in simple geometries", *ASHRAE Transactions*, Vol. 91, pp267-281
- (2) D.L. O'Neal and D.R. Tree, 1984, "Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry", *ASHRAE Transactions*", Vol. 90, Part 2A, pp278-290
- (3) R. Ostin and S. Andersson, 1991, "Frost growth parameters in a forced air stream", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No 4/5, pp1009-1017
- (4) P. F. Monaghan, M. Redfern, P. H. Oosthuizen, F. W. Grealish and D. P. Finn, 1991, "An Automatic Non-contact Measurement Technique for Investigation of the Effect of Frosting on Wind Convector Heat Transfer Performance", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 4, pp399-405
- (5) R.W. Besant, P.E., K.S. Rezkallah, Y.Mao and J.Falk, 1990, "Measurement of Frost Thickness Using A Laser Beam and Light Meter, *ASHRAE Transactions*, *ASHRAE Transactions*", Vol. 96, pp519-522
- (6) G.J. Trammell, D.C. Little and E.M. Killgore, 1968, "A Study of Frost Formed on a Flat Plate Held at Sub-Freezing Temperatures", *ASHRAE Journal*, Vol. 10, No 7, pp42-47
- (7) Y. Mao, R.W. Besant, K.S. Rezkallah, 1992, "Measurement and correlations of frost properties with airflow over a flat plate", *ASHRAE Transactions*, Vol. 98, pp65-78