

소프트 아이스크림 제조기 증발기의 스크레이퍼 회전수 최적화 및 냉매 유로 개선

백승혁, 김내현*
인천대학교 기계공학과

Optimization of the Scraper Speed and Improvement of the Refrigerant Path for the Evaporator of the Soft Ice Cream Machine

Seung-Hyuk Baek, Nae-Hyun Kim*

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University

요약 최근 들어 국민 식생활 문화가 개선되고 생활수준이 향상됨에 따라 소프트 아이스크림, 슬러시와 같은 일회용 냉동 유제품의 소비가 급증하고 있다. 이들 냉동 유제품은 소형 냉동 시스템에서 만들어진다. 소프트 아이스크림 제조기의 경우 냉각기는 동심 원통으로 구성되며 냉매는 환형부에서 증발하고 냉각기 표면에 형성된 얼음 결정이 내측에서 회전하는 스크레이퍼에 의해 빙삭되어 아이스크림이 만들어진다. 본 연구에서는 냉각기 체적 2.8 리터인 R-404A를 사용하는 소프트 아이스크림 제조기에 대하여 최적화와 성능평가를 수행하였다. 최적화는 냉각기 스크레이퍼 회전수 및 냉매 유로 개선에 주안점을 두고 실제 아이스크림 제조기에서 요소 부위의 온도와 압력 그리고 소비동력을 측정함으로써 수행되었다. 실험 결과 최적 회전수는 124 rpm으로 나타났다. 이 회전수에서 아이스크림 제조 시간은 6분 2초이고 이 때 성적계수는 0.90이었다. 또한 물-공기를 사용한 가시화 실험을 통하여 냉매측 유로 개선을 시도하였다. 유로가 개선된 제품은 아이스크림 제조 시간을 현저히 감소시켰다. 본 연구 결과는 냉동식품 제조기를 비롯한 여타 냉동 사이클의 최적화에도 활용될 수 있을 것이다.

Abstract Improvements in the standard of living and lifestyle have led to increased sales of frozen milk products, such as soft ice cream or slush. These frozen milk products are commonly made in a small refrigeration machine. In a soft ice cream machine, the freezer is composed of a concentric cylinder, where the refrigerant flows in the annulus and the ice cream is made in the cylinder by a rotating scraper. In this study, an optimization and performance evaluation were conducted on a soft ice cream machine having a freezer volume of 2.8 liters. The optimization was focused on the scraper rotation speed and the refrigerant path of the freezer. The measurements included the temperature, pressure and consumed power. At the optimized speed of 124 rpm, ice cream was produced in 6 minutes and 2 seconds, and the COP was 0.90. Through a flow visualization study using air-water, the refrigerant path was improved. The improved design reduced the ice cream making time significantly. The present results may be used for the optimization of other refrigeration cycles, including those of frozen food products

Keywords : Optimization, Performance evaluation, R-404A, Refrigeration cycle, Scraper, Soft ice cream

1. 서론

최근 들어 국민 식생활 문화가 개선되고 생활수준이 향상됨에 따라 소프트 아이스크림, 슬러시와 같은 일회용 냉동 유제품의 소비가 급증하고 있다[1]. 이들 냉동

유제품은 소형 냉동 시스템에서 만들어진다. Fig. 1에 소프트 아이스크림 제조기의 전면 사진이 나타나 있다. Fig. 2에는 냉동 사이클이 나타나 있다. 냉동 사이클은 소프트 아이스크림이 만들어지는 냉각기 (freezer), 압축기, 응축기, 온도 조절 팽창밸브 (TEV)로 구성된다. 온

*Corresponding Author : Nae-Hyun Kim(Incheon National University)

Tel: +82-10-3315-8902 email: knh0001@inu.ac.kr

Received September 5, 2017

Revised September 25, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

도 조절 팽창밸브는 압축기 입구의 냉매 과열도를 일정하게 유지하는 장치로 소형 냉동 시스템에 널리 사용된다[2].

Fig. 3에 냉각기의 개략도를 나타내었다. 냉각기는 중심 원통으로 환형부에서 증발하는 냉매에 의해 내측에서 아이스크림이 만들어진다. 소프트 아이스크림 원액은 대략 과당 16%, 유분 12%, 유지방 12%, 물 60%로 구성되는데[3] 이 중 물 성분이 냉각 표면에서 얼음 결정으로 변한다. 이 얼음 결정은 원통 내측에서 회전하는 스크레이퍼 (scraper)에 의해 빙삭되어 소프트 아이스크림이 만들어진다. Fig. 4에 스크레이퍼의 사진이 나타나 있다.

그간 소프트 아이스크림 제조기에 대하여 일부 연구가 수행되었다. Hartel [3]은 아이스크림 첨가제가 얼음 결정 성장에 미치는 영향을 검토하였는데 첨가제의 양이 증가할수록 결정의 크기가 줄어든다고 보고하였다. Lakhar 등 [4]은 스크레이퍼의 회전 속도, 스크레이퍼와 냉각 표면의 간격 등이 전열 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 회전 속도가 증가할수록 간격이 감소할수록 전열 성능은 증가하였다. Saraceno 등 [5]은 원액 온도, 스크레이퍼 회전수 등을 변화시키며 일련의 실험을 수행하고 열전달 상관식을 제시하였다. Martinez 등 [6]은 냉각 표면에서 형성되는 얼음 두께에 따라 스크레이퍼의 간격을 유연하게 조절함으로써 전열 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다. Byun 등 [7]은 실험을 통하여 소프트 아이스크림 제조 시 열전달계수는 원액의 냉각기간 중에는 다소 증가하다가 얼음이 형성되면 그 이후로는 크게 변하지 않는다고 보고하였다. Kim [8]은 냉각기 체적 2.8 리터인 R-404A를 사용하는 소프트 아이스크림 제조기에 대하여 최적화를 수행하였다. 최적화는 적정 냉매량 및 팽창밸브의 개도를 찾는 데 주안점을 맞춰 수행되었다. Park [1]은 냉각기 체적 2.8 리터인 아이스크림 제조기에 대한 기본 설계를 수행하였다. 냉동 시스템 해석 시 열교환기에는 UA-LMTD 모델, 압축기에는 제조사에서 제공하는 성능 곡선이 적용되었다.

아이스크림 제조기가 일반 냉동기와 다른 점은 냉각기에 있다. Fig. 3에 보여 지듯이 환형부를 흐르는 냉매에 의해 원통 내측에 얼음이 형성되고 이 얼음은 회전하는 스크레이퍼에 의해 빙삭된다. 이 경우 얼은 원액으로부터 냉매로 전달되는데 전열 성능에는 스크레이퍼의 형상, 회전수, 냉매측 유로 등이 영향을 미치게 된다.



Fig. 1. Photo of the soft ice cream machine

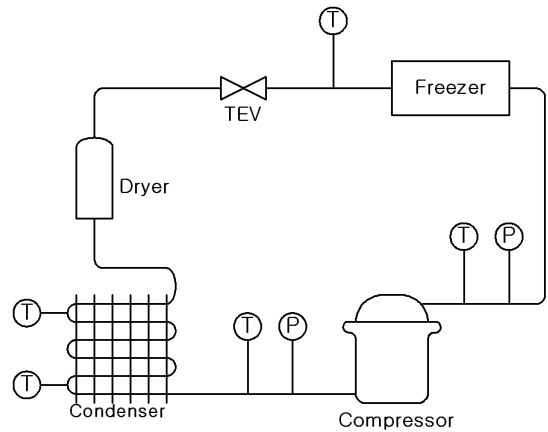


Fig. 2. Refrigeration cycle of the soft ice cream machine shown with measurement points

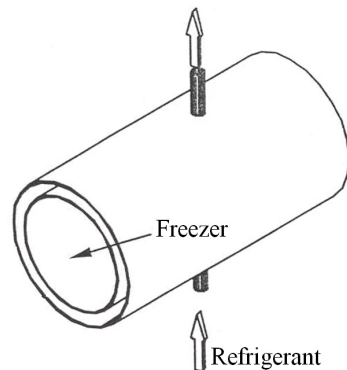


Fig. 3. Schematic drawing of the freezer

현재 국내에서 생산되는 소프트 아이스크림 제조기는 상기 설계 인자들이 전열 성능에 미치는 영향에 대한 평가 없이 외제품을 그대로 복제하는 수준으로 이

부분에 대한 보완이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 냉각기 성능 개선을 목표로 스크레이퍼의 회전수와 냉매 측 유로 형상이 아이스크림 제조 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 최적 스크레이퍼 회전수

기본 설계를 통하여 도출된 아이스크림 제조기의 제원은 Table 1과 같다[1]. 이 제품의 냉각기 체적은 2.8 리터이다. Fig. 5와 같이 풀리와 기어 박스를 설치하여 스크레이퍼의 회전수를 110, 124, 140 rpm으로 변화시켰다. 실험은 원액 주입 후 아이스크림이 완성될 때까지 진행되었다. 아이스크림의 완성여부는 스크레이퍼 회전 모터에 걸리는 전류가 4.6 A가 되는 시점으로 판단하였다. 냉각기 내에서 아이스크림 형성이 진행될수록 스크레이퍼 모터에 걸리는 전류는 증가하게 된다. 모터 전류 4.6 A는 경험을 통하여 결정되었는데 그 때 판매 가능한 아이스크림이 형성되었다.

측정은 응축기 입·출구온도, 증발기 입·출구온도, 압축기 입·출구압력에 대해 수행되었다. 온도는 직경 0.3 mm의 Cu-Co 열전대 (정밀도 ± 0.1 K)를 관 벽에 부착하여 측정하였고 압력은 직경 1.0 mm 압력 공에 압력계 (Setra Model 230, $\pm 0.2\%$ full scale)를 부착하여 측정하였다. 측정위치는 Fig. 2에 나타나 있다. Figs. 6과 7에 회전수를 변화시키며 측정된 압력과 온도가 나타나 있다. 이 데이터는 냉매 충전량 1000g, 팽창변의 개도를 제조사에서 제시한 값 ("0")으로 설정하고 측정된 자료이다. 실험실은 건구온도 32°C, 상대습도 (RH) 65%로 유지되었다.

Fig. 6은 시험 중 냉동 사이클의 압력 변화를 보여준다. 이 그림은 시험 시작 후 1분 후 부터는 압력이 대체로 일정하게 유지됨을 보여준다. 압력(포화온도)이 일정하게 유지된다는 것은 아이스크림 형성시 열전달계수가 일정하다는 의미인데 이는 Byun 등[7]의 연구와 일치한다. 초기 1분은 냉동 사이클이 안정되는 시간으로 판단된다. Fig. 7은 시험 중 냉동 사이클의 온도변화를 보여준다. 온도는 압축기 입구와 출구, 응축기 출구, 증발기 출구에서 측정되었다. Fig. 7은 온도 변화도 압력 변화와 유사하게 시험 시작 1분까지는 급격히 변화다가 그 이후부터는 완만하게 변화함을 보여준다.



Fig. 4. Photo of the scraper

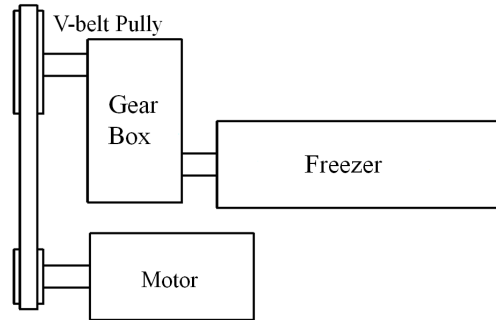


Fig. 5. Schematic drawing of the pulley and gear box

Table 1. Specifications of the soft ice-cream machine

Parts	Specification
Compressor	CAJ2446Z (Tecumsh) 1.2 HP
Freezer	I.D. 103 mm, L = 365 mm
Exp. valve	Parker 204C (1/4 ~ 2 RT)
Condenser	386 mm x 363 mm, 3row, 14step, plain fin, fin pitch 2.0 mm, tube I.D. 9.5 mm

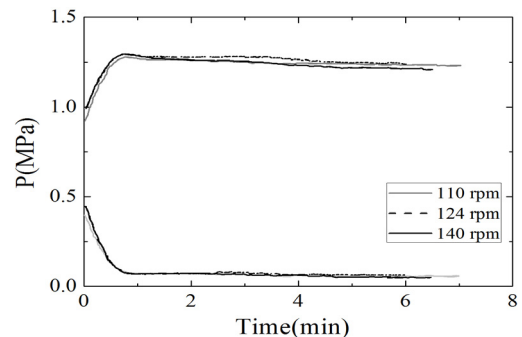


Fig. 6. Compressor inlet and outlet pressures during ice cream formation

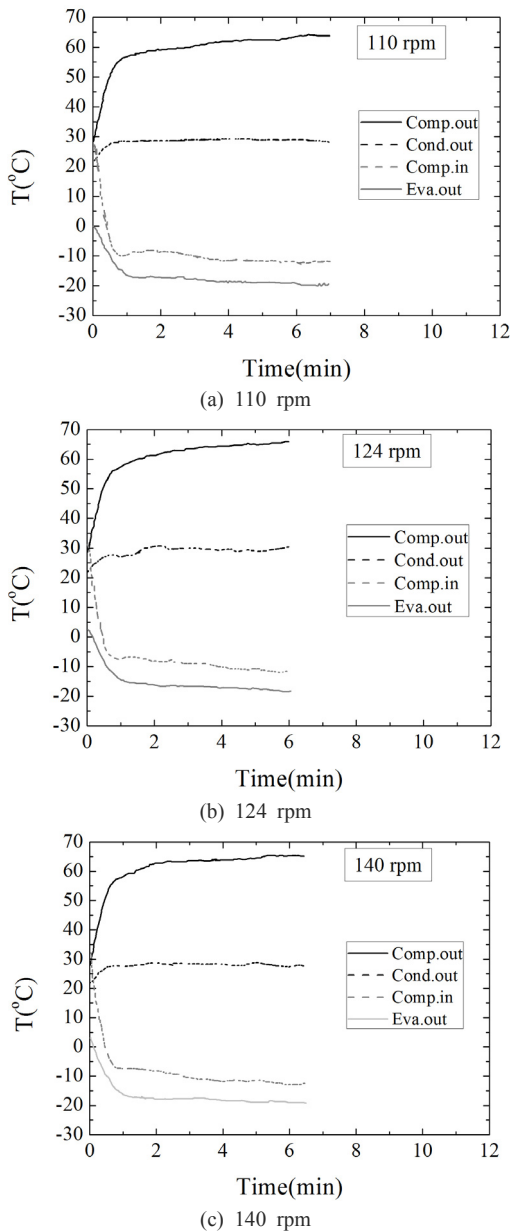


Fig. 7. Measured temperatures during ice cream formation

Figs. 6과 7은 측정된 온도와 압력이 회전수의 변화에 따라 차이가 크지 않음을 보여준다. 한편 아이스크림 제조 시간은 124 rpm에서 최소 (6분 2초)로 나타났다. 이 보다 회전수가 작거나 (110 rpm, 6분 32초) 크면 (140 rpm, 6분 16초) 제조시간이 크게 나타났다. 스크레이퍼의 회전수가 너무 느리면 표면에 아이스크림이 너무 두껍게 형성되어 전열능력이 감소하고 회전수가 너무 빠르

면 얼음이 미처 형성되기도 전에 각여 제조 효율이 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 8에는 회전수에 따른 소비동력을 나타내었다. 여기서 소비동력은 아이스크림 제조기에 공급되는 총 전력으로 압축기와 스크레이퍼를 포함한다. 이 그림은 회전수가 증가할수록 소비 동력이 감소함을 보여준다. 냉각기 표면의 평균 얼음 두께는 회전수가 증가하면 감소하리라 예상되는데 감소한 얼음 두께에 비해 냉각기의 성능이 증가하여 소비 동력이 감소하는 것으로 판단된다. 아이스크림 제조에 소비되는 총 전력량은 Fig. 8의 동력 곡선을 적분하여 구할 수 있다. 회전수 110 rpm에서 전력량은 0.182 kWh, 124와 140 rpm에서는 0.169, 0.173 kWh로 계산되었다. 따라서 회전수 124 rpm에서 제조 시간 (6분 2초)과 전력량 (0.169 kWh)이 최소로 나타났다.

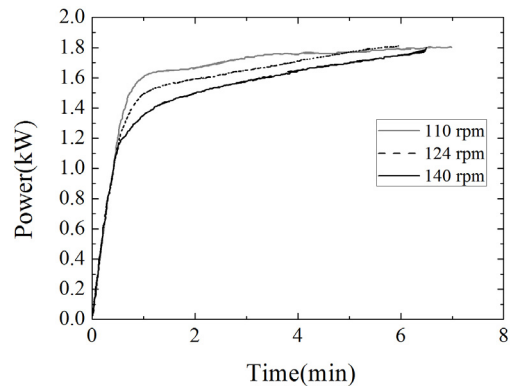


Fig. 8. Power supplied during ice cream formation

3. 냉각기 냉매측 회로 개선

냉각기에서 냉매는 환형 공간 하부에서 건도 0.2 정도로 유입되어 상부에서 기체로 배출된다. 이 경우 냉매가 환형부에 골고루 공급되어 환형부 전체가 전열에 기여하는 것이 중요하다. 기존 냉각기는 냉매측이 환형 공간만으로 구성되었는데 이 경우 냉각기 상부로 냉매가 공급되지 않아서 전열능력이 감소하는 것으로 밝혀졌다. 개선된 형상은 환형부에 두 개의 격판을 설치하고 (Fig. 11a 참조) 격판 상하부의 구멍을 통하여 냉각기 상부로 냉매가 공급되도록 하였다.

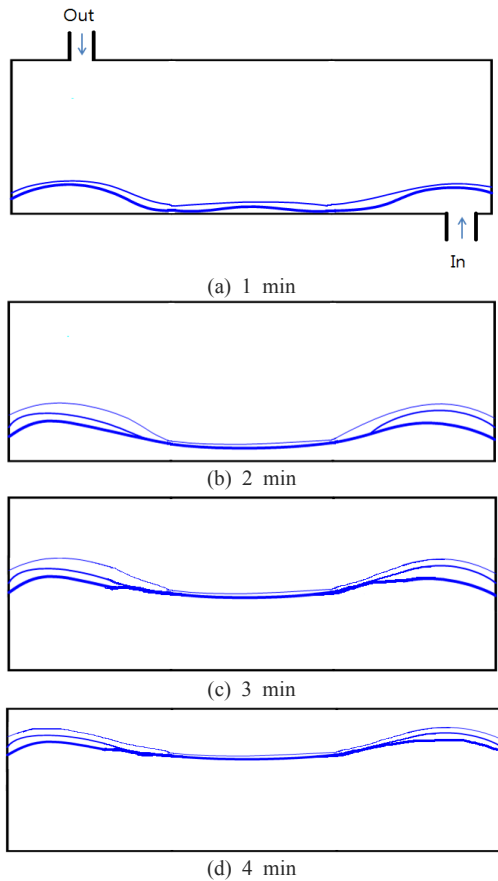


Fig. 9. Frost pattern inside of the freezer

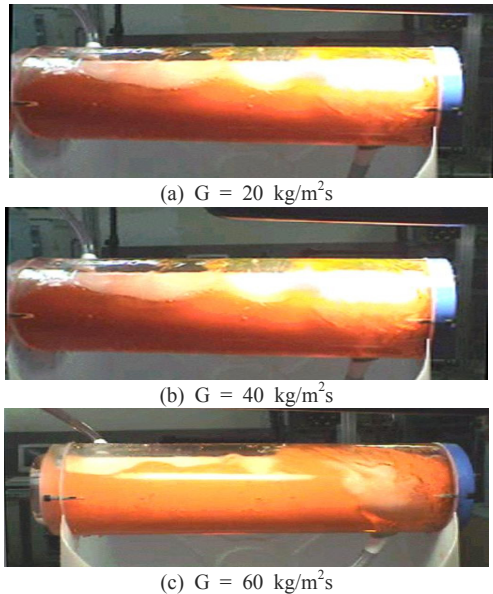
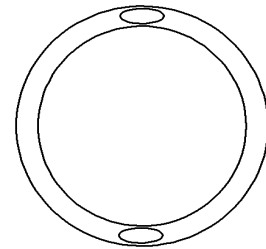


Fig. 10. Air-water flow pattern inside the freezer (no flow blockage)

우선 기존 모델의 냉각 성능을 파악하기 위하여 스크레이퍼를 제거하고 냉각기 내측을 공기 중에 노출시킨 채로 아이스크림 제조기를 가동하였다. 이 때 냉각기 내측에 서리가 형성되는 형상으로부터 냉매의 순환 패턴을 예측하였다. Fig. 9에 시간에 따른 서리 형성 패턴이 나타나 있다. 이 그림은 증발기 하부에서 서리가 형성되어 증발기 전체로 퍼져감을 보여준다. 하지만 증발기 상부에는 서리가 형성되지 않음을 보여주는데 이로부터 상부로 냉매가 원활히 공급되지 않음을 알 수 있다.

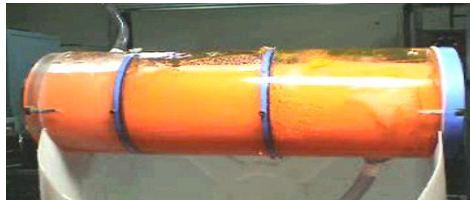
유동 가시화를 통하여 냉매측 유동 형태를 재확인하였다. 가시화를 위하여 환형부 외측을 아크릴로 제작하고 물-공기를 주입하여 액체와 기체의 분포를 검토하였다. 또한 가시화를 돕기 위하여 시험부 입구에서 염료를 주입하였다. 냉매와 물-공기는 기액의 밀도비가 달라 유동 형태가 다소 차이가 있을 수 있으나 시험의 간소화를 위하여 우선 물-공기를 사용하였다. Fig. 10에 격막이 없는 기존 모델의 경우 건도 0.2에서 질량유속 (환형부 기준)이 20에서 60 kg/m²s까지 변화할 때 물-공기의 분포가 보여진다. 이 그림은 모든 질량 유속에서 냉각기 상부에 액체가 공급되지 않는 영역이 존재함을 보여준다. Fig. 11에는 격막이 설치된 경우 건도 0.2에서 질량유속이 20에서 60 kg/m²s 까지 변화할 때 물-공기 분포도를 보여준다. 이 경우 분포가 현저하게 개선되어 냉각기 상부를 제외하고는 거의 대부분이 액체로 덮임을 알 수 있다. Fig. 12에 격막 설치 전후에 측정된 온도 데이터를 나타내었다. 격막 설치로 인하여 아이스크림 제조 시간이 8분 50초에서 6분 2초로 현저히 줄어들었다. 이 때 스크레이퍼 회전수는 124 rpm로 유지되었다.



(a) Flow blockage with top and bottom holes



(b) G = 20 kg/m²s

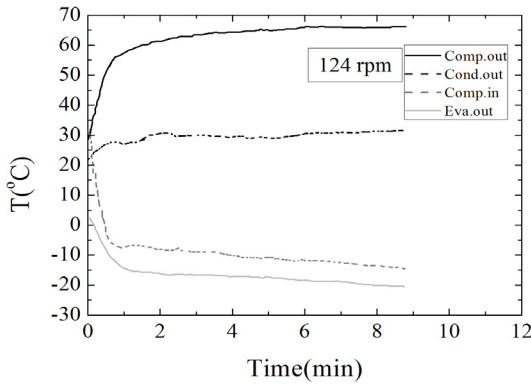


(c) $G = 40 \text{ kg/m}^2\text{s}$

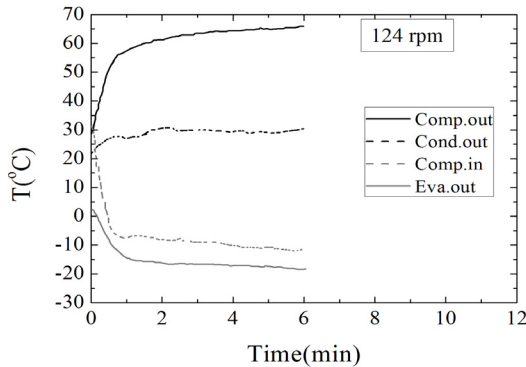


(d) $G = 60 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Fig. 11. Air-water flow pattern inside the freezer (with flow blockage)



(a) Without flow blockage



(b) With flow blockage

Fig. 12. Measured temperatures with and without flow blockage

아이스크림 제조기의 성적계수 (COP)는 아이스크림 제조에 필요한 열량을 소비전력량으로 나눈 값으로 구할 수 있다. 아이스크림 제조기에는 25°C 의 원액이 공급되고 -8°C의 아이스크림이 제조된다 [1]. 열량을 구하기 위

해서는 원액의 비열, 아이스크림 중의 얼음량 등을 알아야하나 이들에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 열량계법을 이용하여 아이스크림 제조 시 소요되는 열량을 구하였다. 즉, 제조된 아이스크림 일정량 ($m_{ice} = 300\text{g}$)과 미리 온도를 알고 있는 물(79°C)을 혼합하여 혼합물의 온도가 초기 원액 온도인 25°C가 될 때까지 투입된 물의 양 ($m_w = 380\text{g}$)을 측정한다. 이 때 외부와의 열 출입이 없도록 충분히 단열된 장치 내에서 실험을 수행한다. 물이 잃은 열량은 아이스크림이 얻은 열량과 같아야 하므로,

$$m_w c_{pw} \Delta T_w = m_{ice} \Delta h_{ice} \quad (1)$$

$$0.38 \text{ kg} \times 4.2 \text{ kJ/kgK} \times (79-25) \text{ K} = 0.3 \text{ kg} \times \Delta h_{ice}$$

$$\Delta h_{ice} = 287 \text{ kJ/kg}$$

즉, 25°C 원액 1 kg을 아이스크림으로 만드는데 들어가는 열량 (Δh_{ice})은 287 kJ/kg이다. 따라서 아이스크림 제조기 성적계수는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\text{COP} = \frac{[\Delta h_{ice} \times \text{Mass of ice cream (kg)}]}{\text{(Power consumption)}} \quad (2)$$

여기서 원액 투입량 (아이스크림 질량)은 1.9 kg이고 소비 전력량은 최적 회전수에서 0.169 kWh이다. 따라서 0.90의 성적계수가 얻어졌다.

4. 결론

본 연구에서는 냉각기 체적 2.8 리터급의 R-404A를 사용하는 소프트 아이스크림 제조기에 대하여 최적화를 수행하였다. 최적화는 스크레이퍼 최적 회전수 및 냉매 유로 개선에 주안점을 맞춰 수행되었다.

- (1) 최적 스크레이퍼 회전수는 124 rpm으로 나타났다. 이 회전수에서 아이스크림 제조 시간은 6분 2초이고 소비 전력량은 0.169 kWh로 나타났다. 또한 0.90의 성적계수가 얻어졌다.

- (2) 물-공기를 사용한 가시화 실험을 통하여 냉매측 유로를 개선하였다. 개선된 제품은 아이스크림 제조 시간을 현저히 감소시켰다.
- (3) 본 연구 결과는 냉동식품 제조기를 비롯한 여타 냉동 사이클의 최적화에도 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] H.-C. Park, "Development of an Ice-Cream Machine for R-404A," Final Report to ITEP, CFC Alternative Material Development Program, Se-A E&C, 2006.
- [2] W. F. Stoecker, J. W. Jones, "Refrigeration and Air Conditioning," 2nd Ed., McGraw-Hill Pub., 1983.
- [3] R. W. Hartel, "Ice Crystallization During the Manufacture of Ice Cream," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 7, pp. 315-321.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(96\)10033-9](https://doi.org/10.1016/0924-2244(96)10033-9)
- [4] M. B. Lakhdar, R. Cerecero, G. Alvarez, J. Guilpart, D. Flick, A. Lallemand, "Heat Transfer with Freezing in a Scraped Surface Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 45-60, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.007>
- [5] L. Saraceno, G. Boccardi, G. P. Celata, R. Lazzarini, R. Trinchieri, "Development of Two Heat Transfer Correlations for a Scraped Surface Heat Exchanger in an Ice Cream Machine," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 4106-4112, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.022>
- [6] D. S. Martinez, J. P. Solano, F. Illan, A. Viedma, "Analysis of Heat Transfer Phenomena During Ice Slurry Production in Scraped Surface Plate Heat Exchangers," *Int. J. Refrig.*, vol. 48, pp. 221-232, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.020>
- [7] H.-W. Byun, J.-W. Lee, N.-H. Kim, "Heat Transfer Characteristics in the Evaporator of the Ice Cream Maker," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 13, no. 4, pp. 1466-1473, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1466>
- [8] N.-H. Kim, "Optimization of the Refrigerant Charge and the Expansion Valve Opening for the Soft Ice Cream Machine Using R-404A," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 18, no. 8, pp. 728-734, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.728>

백 승 혁(Seung-Hyuk Baek)

[정회원]



- 2016년 2월 : 인천대학교 (학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

열전달, 공기조화 및 내용

김 내 현(Nae-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 12월 : Penn. State University Pennsylvania, PA, U.S.A (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

열전달, 공기조화 및 내용