

## 소형 제빙기에 사용되는 R-404A 대체 R-448A, R-449A의 Drop-in Test에 대한 연구

이병무<sup>1</sup>, 김내현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(주)아이스트로, <sup>2</sup>인천대학교 기계공학과

### A Study on the Drop-in Tests of a Small Ice Maker Using R-404A Replacements R-448A and R-449A

Byungmoo Lee<sup>1</sup>, Nae-Hyun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Icetro Inc.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Incheon, Korea

**요약** 그간 소형 제빙기에는 R-404A가 사용되어 왔으나 지구 온난화와 관련하여 대체 냉매 적용이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 제빙기에 적용되어 온 R-404A를 대체할 R-448A와 R-449A에 대하여 drop-in test를 수행하였다. 시험은 외기 온도와 증발판에 공급되는 물 온도를 변화시키며 수행되었다. 실험 결과 R-404A의 일 평균 제빙량은 R-448A보다는 5.3%, R-449A보다는 4.2% 크게 나타났다. 이는 R-404A의 기체 밀도가 커서 냉매 순환량이 증가하기 때문으로 판단된다. 한편 R-448A와 R-449A의 제빙량을 비교하면 외기온도나 물 온도가 낮아 제빙량이 많으면 R-448A가, 외기 온도나 물 온도가 높으면 R-449A가 우수한 성능을 보인다. 일 평균 소비 전력량은 R-448A나 R-449A보다 R-404A에서 대략 10% 크게 나타났다. 한편 성적계수의 경우 R-448A와 R-449A는 거의 동일하고 R-404A의 값보다는 3.0% 크게 나타났다. 현재 R-448A, R-449A의 증발, 응축 열전달에 대한 데이터가 부족한 실정으로 향후 이 부분에 대한 기초 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**Abstract** R-404A, which is used widely in small-scale ice makers, is scheduled to be phased out because of its high global warming potential. In this study, drop-in tests were conducted using R-448A and R-449A, which replace R-404A, to modify the outdoor air and supply water temperatures. The results showed that the daily ice production rate of R-404A was 5.3% higher than that of R-448A and 4.2% higher than that of R-449A. This was attributed to the larger vapor density of R-404A, which resulted in a larger mass flow rate in the system. Between R-448A and R-449A, R-448A yielded a larger amount of ice at low air and water temperatures, whereas R-449A yielded a larger amount of ice at high air and water temperatures. The daily power consumption of R-404A was approximately 10% larger than those of R-448A and R-449A. The resulting COPs of R-448A and R-449A was similar, only 3.0% larger than that of R-404A. The literature survey showed that the condensation or evaporation data of R-448A or R-449A are very limited, and research on this issue is recommended.

**Keywords** : Ice Maker, Alternative Refrigerant, Drop-in Test, R-404A, R-448A, R-449A

## 1. 서론

최근 들어 국민의 식생활 문화가 개선되고 생활수준이 향상됨에 따라 소형 제빙기에 대한 수요가 급증하고

있다. 소형 제빙기는 주로 호텔, 병원이나 식당과 같은 업소에서 식품이나 음료의 신선도를 유지하기 위해 사용된다. 업소에서 사용되는 제빙기로는 100 kg/day 급이 널리 사용되는데 설치 장소에 따라 크기의 제약이 있고

\*Corresponding Author : Nae-Hyun Kim(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-4541 email: knh0001@incheon.ac.kr

Received September 28, 2018

Revised November 27, 2018

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

저소음이어야 하며 응축열도 실내로 방출되는 등 고려해야 할 사항이 많이 있다. Fig. 1에 제빙기의 사진이, Fig. 2에는 냉동 사이클이 나타나있다.

제빙기는 일반 에어컨이나 냉장고와는 달리 수직형 증발판이 사용되고 상부에서 공급되는 물에 의하여 얼음이 형성된다. Fig. 3에 증발기의 개략도를 나타내었다. 증발기 출구의 기체 냉매는 압축기에서 고압의 기체 냉매가 되고 응축기를 통과하며 액 냉매로 변한다. 이 액 냉매는 팽창변을 통과하며 저압의 기액 혼합 냉매로 증발기 입구에 공급된다. 증발기에서는 냉매가 기화하며 제빙을 수행한다. 얼음이 완전히 형성되면 냉동사이클이 탈빙(핫 가스) 사이클로 전환되며 압축기 출구의 핫가스에 의하여 탈빙된다. 얼음이 형성되는데 걸리는 시간은 대략 15-25분 정도이고 탈빙에 걸리는 시간은 1-2분 정도이다.

제빙과 관련된 문헌으로 Mishichenko et al.[1]은 액적 충돌시 액적의 온도에 대하여, Jin et al.[2]은 표면의 젖음성에 따른 액적의 접촉 직경 변화에 대하여 연구하였다. 또한 Feuillebois et al.[3]는 결빙 과정 중 표면의 특성에 따른 결빙 시간 및 얼음 입자의 형상에 대하여 연구하였다. 한편 Sait[4]는 관군 외측의 얼음 형성 모델을 제시하였고 Jung and Park[5]는 관 단면 형상이 제빙에 미치는 영향을 검토하였다. 아울러 Jannesari and Abdollahi[6]는 관 외측에 환형 핀, 원형 링 등을 부착하여 제빙 성능을 향상시키는 연구를 수행하였고 Kulyakhtin et al.[7]은 수 분무식 관 외측에서의 제빙 모델을 제시하였다.

그간 소형 제빙기에는 R-404A가 사용되어 왔으나 지구 온난화와 관련하여 대체 냉매 적용이 시급한 실정이다[8,9]. R-404A는 R-125, R-143a, R-134a의 근공비 혼합물인데 지구 온난화 지수가 3922로 매우 높다. R-404A 대체 냉매로는 두 종류가 검토되고 있다[10]. 한 종류는 R-448A, R-449A로 대표되는 불연성 냉매인데 R-448A의 지구 온난화 지수는 1273이고 R-449A의 지구 온난화 지수는 1282이다. 다른 한 종류는 R-455A, R-454C로 대표되는 약 가연성 냉매인데 지구 온난화 지수는 두 냉매 모두 148로 매우 낮다. 일반적으로 대체냉매의 냉각능력은 R-404A보다 다소 낮고 COP는 다소 높은 것으로 알려져 있다[11,12]. 본 연구에서는 불연성 냉매인 R-448A와 R-449A를 대상으로 하였다.



Fig. 1. Photo of an unitary ice maker

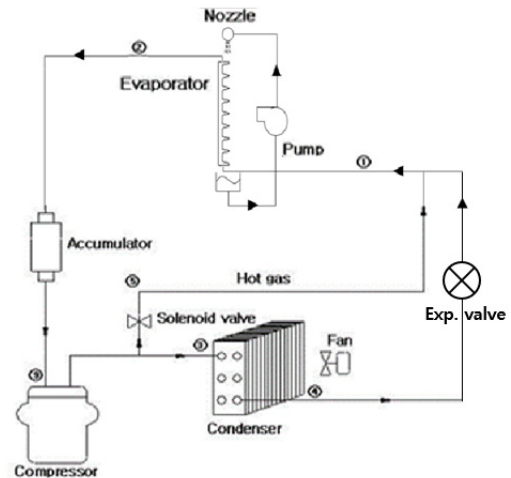


Fig. 2. Refrigeration cycle of an unitary ice maker

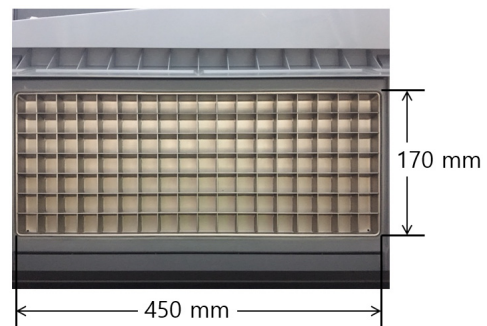


Fig. 3. Photo of an evaporator plate

Table 1. Properties of R-404A, R-448A, R-449A

| Properties*                   | R404A | R448A | R449A |
|-------------------------------|-------|-------|-------|
| $P_{sat}$ (MPa)               | 0.610 | 0.639 | 0.632 |
| $\rho_v$ (m <sup>3</sup> /kg) | 30.3  | 22.1  | 22.4  |
| $\rho_l$ (m <sup>3</sup> /kg) | 1150  | 1192  | 1198  |
| $h_{lv}$ (kJ/kg)              | 164   | 217   | 211   |
| $c_{pv}$ (kJ/kgK)             | 1.00  | 0.98  | 0.98  |
| $c_{pl}$ (kJ/kgK)             | 1.39  | 1.42  | 1.42  |
| $\mu_v$ ( $\mu Pa s$ )        | 11.00 | 11.42 | 11.29 |
| $\mu_l$ ( $\mu Pa s$ )        | 179.7 | 188.4 | 190.5 |
| $k_v$ (mW/mK)                 | 12.82 | 12.01 | 12.03 |
| $k_l$ (mW/mK)                 | 73.15 | 92.41 | 91.83 |
| Temp. glide (K)               | 0.51  | 4.73  | 4.51  |

\*At 0°C temperature

Table 1에 R-404A와 R-448A, R-449A의 물성치를 0°C에서 비교하였다. R-448A는 R-32/R-125/R134a/R1234ze/R1234yf가 26/26/21/7/20의 비율로 혼합된 5중 혼합냉매이고 R-449A는 R-32/R-125/R-134/R1234yf가 24.3/24.7/25.7/25.3의 비율로 혼합된 4중 혼합냉매이다. 이들 냉매의 물성치는 Refprop [13]으로부터 구하였다. R-448A와 R-449A의 물성치는 R-448A의 온도구배가 다소 큰 것 (4.74°C와 4.51°C)을 제외하고는 매우 유사한 값을 보인다. 한편 R-448A와 R-449A는 R-404A에 비하여 기체 밀도는 작고 증발 잠열과 열전도도는 큼을 보여준다. 기체 밀도가 작으면 압축기에 의한 냉매 순환량이 감소하여 냉각능력이 감소한다, 반면에 증발 잠열과 열전도도가 크면 냉각능력이 증가한다. 따라서 전체 시스템의 냉각 능력은 이 둘 중 어느 것이 지배적인가에 따라 다르게 나타나게 된다.

본 연구에서는 제빙기에 적용하는 R-404A 대체 냉매 개발[14]의 일환으로 R-448A와 R-449A의 drop-in test를 수행하였다. Drop-in test는 동일한 제빙기에 냉매만을 바꿔 넣고 수행하는 성능시험을 의미한다. 이 때 냉매의 충전량과 팽창변의 개도는 냉매 특성에 맞춰 최적화한다. 시험은 외기 온도와 증발관에 공급되는 물 온도를 바꿔가며 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

소형 제빙기 시험 규격은 ASHRAE Standard 29[15]에 규정되어 있는데 본 연구에서는 그 절차에 따라 시험

Table 2. Test conditions of the ice maker

| Case | Outdoor temp. (°C) | Water temp. (°C) |
|------|--------------------|------------------|
| 1    | 21                 | 10               |
| 2    | 10                 | 10               |
| 3    | 38                 | 10               |
| 4    | 27                 | 21               |
| 5    | 32                 | 21               |
| 6    | 38                 | 21               |

을 수행하였다. 제빙기의 실험에 대하여는 유관 논문 [15]에 상세히 기술되어 있으므로 여기서는 간략히 기술하도록 하겠다. 실험은 설정 온도의 물 1.2 kg을 증발기 하부의 물받이에 부은 후 압축기를 가동시킴으로 시작되었다. 물 라인은 항온조에 연결되어 지속적으로 설정 온도의 물이 물받이에 보충된다. 시험 중 압축기의 입출구, 증발기의 입출구, 응축기 출구, 물 라인 입구에서 온도를 측정하고 압축기 입출구에서 압력을 측정하였다. 시험 중 증발기 입구 온도가 -20°C에 도달하면 얼음 형성이 완료되었다고 판단하고 핫 가스 사이클로 전환하였는데 이 온도는 빙질, 얼음량 등을 근거로 경험적으로 얻어졌다[14].

제빙 사이클이 완료되면 탈빙을 위해 핫 가스 사이클로 변환된다. Fig. 1에 핫 가스 사이클이 나타나 있다. 탈빙시 압축기 출구의 고온 가스 냉매는 응축기와 모세관을 우회하여 직접 증발기로 유입된다. 유입된 핫 가스는 증발기에 부착된 아이스 켓의 온도를 올려 얼음을 탈착시킨다. 핫 가스 유입 시간이 너무 짧으면 탈빙이 불완전하고 반대로 너무 길면 증발기의 온도를 올려 차기 제빙 사이클의 냉각 부하가 증가된다. 따라서 적절한 핫 가스 유입 시간이 존재하게 되는데 별도의 실험을 통하여 증발기 입구 온도가 25°C가 되면 탈빙 사이클이 완료되는 것으로 판단하였다[14]. 상기 제빙과 탈빙 사이클을 세 차례 반복하여 평균값을 확보하였다. 얼음 생산량은 얼음의 무게를 재어 결정하였다.

제빙기는 건물 내에 설치되는 경우도 있고 때에 따라서는 건물 외부에 설치되기도 하므로 넓은 외기 온도 조건에서 작동이 가능하여야 한다. 따라서 실험은 외기 온도와 공급수 온도를 변화시키며 6가지 조건에서 수행되었다. Table 2에 변화된 외기와 공급수 온도를 나타내었다. Case 1은 표준 조건으로 실내 온도가 21°C이고 공급수 온도가 10°C인 경우이다. Case 2는 저온 조건으로 실내 온도가 10°C이고 수온은 10°C인 경우이고 Case 3는

고온 조건으로 실내 온도가 38°C이고 수온이 10°C인 경우이다. Case 4와 5는 수온이 21°C인 경우이고 Case 6는 수온이 32°C, 외기 온도가 38°C인 극한 조건에 속한다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 3에 본 연구에 사용된 100 kg.day급 제빙기 제원이 나타나 있다. 압축기는 Embraco사의 R-404A용 NEK6181GK (1/2 마력)을 사용하였고 증발기는 증발판에 가로 25 mm, 세로 25 mm, 깊이 30 mm인 아이스컵이 126개 부착된 형상으로 (Fig. 3 참조) 상부에서 흘러내리는 순환수에 의하여 얼음이 형성된다. 증발판 후면에는 외경 9.0 mm 증발관이 지그재그로 용접되어 아이스컵에 냉열을 제공한다. 팽창 밸브는 Danfoss 사의 1.0 kW 용량의 068U1095 모델을 사용하였고 응축기는 전방면적 420 mm x 218 mm, 4열, 10단, 외경 7.0 mm 응축관 외측에 웨이브 핀이 핏치 1.5 mm로 장착되어 있다.

Table 4에 별도의 실험[14]을 통하여 얻어진 최적 냉매량과 팽창 밸브의 개도를 나타내었다. R-404A의 경우 냉매 충전량 400 g, 팽창 밸브 1 회전에서, R-448A는 냉매 충전량 440 g, 팽창 밸브 1.5 회전에서, R-449A는 냉매 충전량 440 g, 팽창 밸브 1 회전에서 최대 제빙량을 얻을 수 있었다. 실험은 표준 조건 (외기 21°C, 공급수 온도 10°C)에서 수행되었다.

Table 5에 표준 조건 (외기 21°C, 공급수 온도 10°C)에서 얻어진 제빙 시간, 탈빙 시간, 일 평균 제빙량, 압축기 입구 압력, 압축기 출구 압력, 압축기 출구 온도, 응축기 출구 온도, 증발기 입구 온도, 증발기 출구 온도, 압축기 입구 온도, 공급수 온도, 소비 전력, 일 평균 소비 전력량을 나타내었다. 증발판에 얼음이 형성될수록 증발기의 전열성능은 감소하고 증발온도는 점점 내려가게 된다. 즉, 제빙기 시스템의 온도 및 압력은 연속적으로 변하는데 Table 5에 나타난 온도 및 압력 그리고 소비 전력은 제빙 완료시점에서의 값이다. Fig. 4에는 Table 5에 나타난 온도와 압력을 온도-엔트로피 선도 상에 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 R-448A와 R-449A의 온도 구배 (temp. glide)가 R-404A 보다 현저히 큼을 선도 상에서 확인할 수 있다. Table 1에 나타난 온도 구배와 Fig. 4의 증발기 입출구의 온도차가 다른 이유는 증발기 출구 과열, 증발기에서의 압력손실, 증발 온도의 차이 등에 따른 것으로 판단된다.

Table 3. Specification of major components

| Parts      | Specification                                                                    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Compressor | NEK6181GK(Embraco), 1/2 HP                                                       |
| Evaporator | Ice cup size: 25 mm × 25 mm × 30 mm, 126 ea.<br>Eva. tube: 9.0 mm O.D,           |
| Exp. valve | TEV 068U2095(Danfoss), 1.0 kW                                                    |
| Condenser  | 420 mm × 218 mm, 10 step,<br>wave fin, 4 row, 1.5 mm fin pitch, 7.0 mm tube O.D. |

Table 4. Optimum refrigerant charge and expansion valve opening for different outdoor/water temperatures

| Item          | R404A  | R448A    | R449A  |
|---------------|--------|----------|--------|
| Charge        | 400 g  | 440 g    | 440 g  |
| Valve opening | 1 turn | 1.5 turn | 1 turn |

Table 5. Test results at 21°C outdoor and 10°C water temperature

| Item                           | R404A  | R448A  | R449A  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| Ice making time                | 17'1"  | 17'45" | 17'50" |
| Ice detachment time            | 1'33"  | 1'33"  | 1'31"  |
| Cycle time                     | 18'34" | 19'18" | 19'21" |
| Amount of ice per cycle (kg)   | 1.165  | 1.191  | 1.178  |
| Amount of ice per day (kg/day) | 90.3   | 88.9   | 87.7   |
| Low pressure (bar)             | 2.18   | 1.69   | 1.75   |
| High pressure (bar)            | 13.4   | 12.6   | 12.6   |
| Comp. out temp. (°C)           | 64.8   | 67.7   | 65.6   |
| Cond. out temp. (°C)           | 29.5   | 26.0   | 26.6   |
| Eva. in temp. (°C)             | -18.5  | -22.5  | -21.4  |
| Eva. out temp (°C)             | -15.9  | -15.7  | -16.3  |
| Comp. in temp. (°C)            | 12.8   | 10.7   | 8.6    |
| Water temp. (°C)               | 10.2   | 9.8    | 10.0   |
| Power consump. (kW)            | 0.44   | 0.36   | 0.39   |
| Power consump. per day (kWh)   | 11.58  | 10.49  | 10.52  |
| COP                            | 0.817  | 0.887  | 0.873  |

Table 5는 제빙 완료시 형성되는 R-448A와 R-449A의 온도와 압력이 유사함을 보여준다. 또한 제빙 및 탈빙 시간도 거의 같다. 이는 Table 1에 나타난 바와 같이 두 냉매의 물성치가 유사하기 때문이다. 한편 R-404A의 경우는 R-448A와 R-449A에 비하여 제빙시간이 5% 가량 단축됨을 보여준다. 또한 일 평균 제빙량도 2%~3% 많다. 제빙 시간의 측정 오차는 ± 2초이고 일 제빙량의 측정

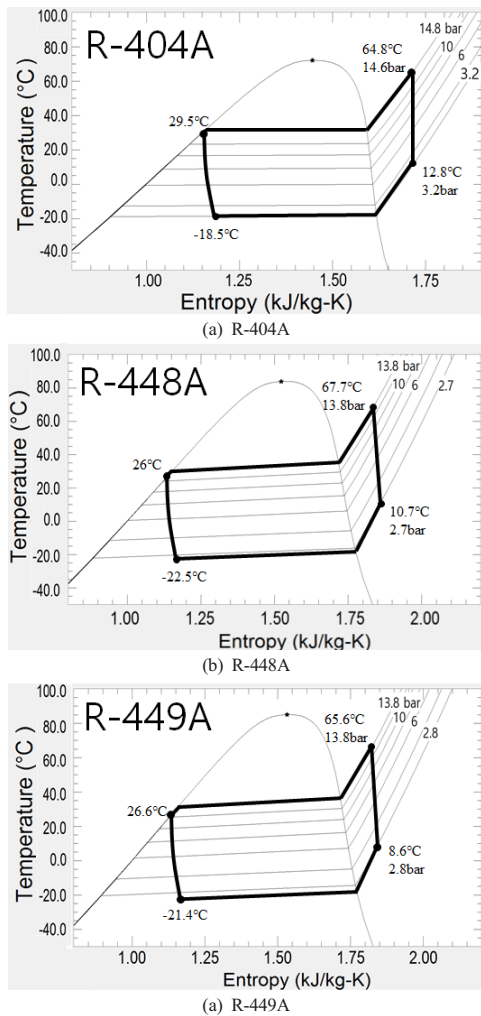


Fig. 4. Refrigeration cycles of the ice maker for R-404A, R-448A and R-449A

오차는  $\pm 0.5$  kg 으로 나타났다. Table 5를 보면 R-404A의 압력과 증발기 입구 온도는 R-448A와 R-449A보다 다소 높고 증발기 출구 온도는 유사함을 보여준다. 이 외에 세 냉매는 사이클 상에 큰 차이는 없어 보인다. 그렇다면 물성치에서 성능에 차이가 나는 이유를 찾아 볼 수 있을 것이다. 전술하다시피 R-404A는 R-448A와 R-449A에 비하여 기체 밀도는 다소 높고 증발 잠열과 열전도도는 작다. 기체 밀도가 크면 냉매 순환량이 증가하여 냉각능력이 증가한다. 이 증가량이 증발 잠열과 열전도도 감소에 따른 냉각능력 감소보다 커서 R-404A의 제빙능력이 R-448A와 R-449A보다 다소 크게 나타난 것으로 판단된다.

Table 5의 밑에서 두 번째 열에는 제빙기에 사용된 일 평균 소비전력량을 나타내었다. 소비 전력의 측정 오차는  $\pm 10$  W 이다. R-448A나 R-449A보다 R-404A에서 대략 10% 크게 나타났는데 이는 R-404A의 냉매 순환량이 R-448A나 R-449A보다 크기 때문이다. Table 5의 마지막 열에는 제빙기의 성적계수 (COP)를 나타내었다. 성적계수는 10°C 물이 0°C 얼음으로 변화하는데 필요한 열량을 제빙기 소비 전력으로 나누어 구한다. Table 5는 R-448A와 R-449A의 성적계수가 R-404A보다 7%~9% 큼을 보여준다. 성적계수의 측정 오차는  $\pm 2\%$  이내로 나타났다. 상기 내용을 정리하면 대체 냉매인 R-448A와 R-449A의 제빙능력은 R-404A보다 2%~3% 부족하나 성적계수는 7%~9% 큼을 알 수 있는데 이는 기존 연구자[11,12]와 일치하는 결과이다.

Fig. 5에 외기온도와 공급수 온도를 변화시켜 가며 측정한 일 평균 제빙량을 나타내었다. 여기서 x-축의 첫 번째 숫자는 외기 온도를, 두 번째 숫자는 물 온도를 의미한다. 제빙량은 외기 온도가 증가할수록, 물 온도가 증가할수록 감소함을 보인다. 외기 온도가 증가하면 응축 온도도 증가하고 따라서 냉매 순환량이 감소하게 되어 제빙량이 감소하게 된다. 한편 물 온도가 증가하면 공급수가 0°C 얼음으로 변화하는데 필요한 열량이 증가하게 되고 따라서 제빙량은 감소하게 된다.

Fig. 5는 R-404A의 일 평균 제빙량이 R-448A와 R-449A에 비하여 큼을 보이는데 6가지 온도 조건에서의 제빙량을 평균한 값을 비교하면 R-448A보다는 5.3%, R-449A보다는 4.2% 크다. R-448A와 R-449A를 비교하면 제빙량이 70 kg/day 이상이면 R-448A의 성능이 우수하고 70 kg/day 이하이면 R-449A의 성능이 우수하다. 즉, 외기온도나 물 온도가 낮아 제빙량이 많으면 R-448A가, 외기 온도나 물 온도가 높으면 R-449A가 우수한 성능을 보이는데 그 이유를 파악하기 위해서는 증발, 응축 성능 등 기초 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되나 이에 대한 자료는 부족한 실정이다.

Fig. 6에는 일 평균 소비 전력량을 나타내었다. 6가지 온도 조건에서 평균한 값을 비교하면 R-404A의 일 평균 소비 전력량이 R-448A보다는 8.1%, R-449A보다는 6.5% 크다. 이는 R-404A의 냉매 순환량이 크기 때문이다. R-448A와 R-449A를 비교하면 R-449A의 소비 전력량이 R-448A의 값보다 1.6% 크다. Fig. 7에는 성적계수를 나타내었다. 6가지 온도 조건에서 평균한 값을 비교



하면 R-448A와 R-449A의 평균 값은 동일하고 R-404A의 값보다는 3.0% 크다. R-448A와 R-449A를 비교하면 외기 온도나 물 온도가 낮으면 R-448A의 성능이 우수하고 그 반대이면 R-449A의 성능이 우수하다. 이는 Fig. 5의 제빙량과 동일한 경향이다.

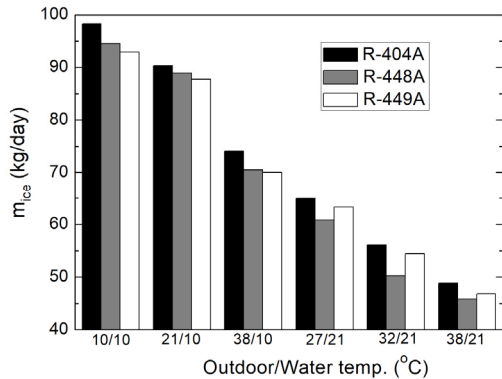


Fig. 5. Daily ice production for different outdoor/water temperatures

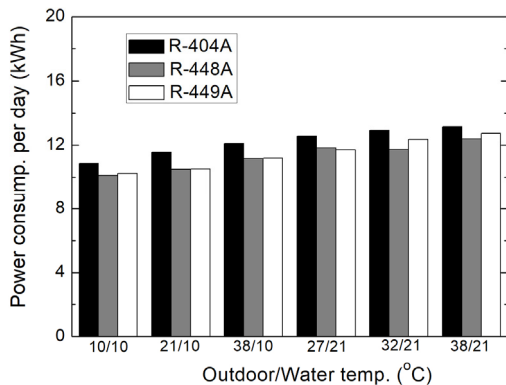


Fig. 6. Daily power consumption for different outdoor/water temperatures

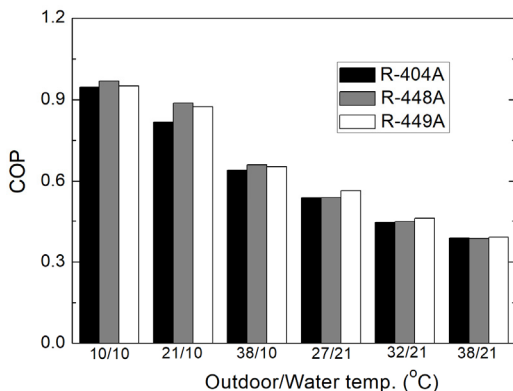


Fig. 7. COP for different outdoor/water temperatures

## 4. 결론

본 연구에서는 제빙기에 적용하는 R-404A 대체 냉매인 R-448A와 R-449A에 대하여 drop-in test를 수행하였다. 시험은 외기 온도와 증발관에 공급되는 물 온도를 바꿔가며 수행하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) R-404A의 일 평균 제빙량은 R-448A 보다는 5.3%, R-449A보다는 4.2% 크다. 이는 R-404A의 기체 밀도가 커서 냉매 순환량이 증가하기 때문으로 판단된다.
- (2) R-448A와 R-449A의 제빙량을 비교하면 외기 온도나 물 온도가 낮아 제빙량이 많으면 R-448A가, 외기 온도나 물 온도가 높으면 R-449A가 우수한 성능을 보인다.
- (3) 일 평균 소비 전력량은 R-448A나 R-449A보다 R-404A에서 대략 10% 크게 나타났다. 이는 R-404A의 냉매 순환량이 크기 때문이다.
- (4) 성적계수의 경우 R-448A와 R-449A는 거의 동일하고 R-404A의 값보다는 3.0% 크게 나타났다.
- (5) 향후 R-448A, R-449A의 증발, 응축 열전달에 대한 기초 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur, J. A. Taylor, T. Krupenkin and J. Aizenberg, "Design of Ice-Free Nano-structured Surfaces Based on Repulsion of Ice Droplet," *ACS Nano*, Vol. 4, pp. 7699-7007, 2010.
- [2] Z. Jin, Z. Wang, D. Sui and Z. Yang, "The Impact and Freezing Process of a Water Droplet on Different Inclined Cold Surfaces," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 97, pp. 211-213, 2016.
- [3] A. Feuillebois, A. Lasek, P. Creismas, F. Pigeonneau and A. Szaniawski, "Freezing of a Subcooled Liquid Droplet," *J. Colloid. Sci.*, Vol. 169, pp. 90-102, 1995.
- [4] H. H. Sait, "Heat Transfer Analysis and Effects of Feeding Tube Arrangement, Falling Film Behavior and Backsplash on Ice Formation Around Horizontal Tube Bundles," *Energy Conv. Manage.*, Vol. 73, pp. 317-328, 2013.
- [5] E.-H. Jung and K.-W. Park, "Ice Making Characteristics According to Changing Shape of Ice Making Tube," *Korean J. Air-Cond. Refrig.*, Vol. 21, No. 5, pp. 291-296, 2009.
- [6] H. Jannesari and N. Abdollahi, "Experimental and Numerical Study of Thin Ring and Annular Fin Effects on Improving the Ice Formation in Ice-on-Coil Thermal Storage Systems," *Appl. Energy*, Vol. 189, pp. 369-384, 2018.

2017.

- [7] A. Kulyakhtin, S. Kulyakhtin and S. Loset, "The Role of the Ice Heat Conduction in the Ice Growth Caused by Periodic Sea Spray," *Cold Regions Sci. Tech.*, Vol. 127, pp. 93-108, 2016.
- [8] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbri, A. Barragan-Cervera, F. Moles and B. Peris, "Theoretical Comparison of Low GWP Alternatives for Different Refrigeration Configurations Taking R-404A as Baseline," *Int. J. Refrig.*, Vol. 44, pp. 81-90, 2014.
- [9] A. Sethi, G. Pottker and S. Y. Motta, "Experimental Evaluation and Field Trial of Low Global Warming Potential R-404A Replacements for Commercial Refrigeration," *Sci. Tech. Built. Environ.*, Vol. 22, No. 8, pp. 1175-1184, 2016.
- [10] X. Wang and K. Amrane, "AHRI Low Global Warming Potential Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP) - Summary of Phase 1 Testing Results, 5<sup>th</sup> Int. Refrigeration Air-Cond. Conf., Purdue, USA, Paper 1554, 14-17 July, 2014.
- [11] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbri, B. Peris, F. Moles and G. Verdu, "Experimental Evaluation of R-448A as R-404A Lower-GWP Alternative in Refrigeration Systems," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 105, pp. 756-762, 2015.
- [12] P. Makhnatch, A. Mota-Babiloni, J. Rogstam and R. Khodabandeh, "Retrofit of Lower GWP Alternative R-449A into an Existing R-404A Indirect Supermarket Refrigeration System," *Int. J. Refrig.*, Vol. 76, pp. 184-192, 2017.
- [13] REFPROP, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 9.1, <https://www.nist.gov/srd/refprop/>.
- [14] B.-M. Lee, Development of a Low GWP Ice Maker, Advanced Technology Center Assigned to Iccetro Inc., 1<sup>st</sup> Year Report, 2017.
- [15] ASHRAE Standard 29, Method of Testing Automatic Ice Makers, ASHRAE, 2009.

## 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

## 이 병 무(Byung-Moo Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1990년 2월 ~ 2014년 1월 : 삼성전자 근무
- 현재 : (주)아이스트로 기술연구소 근무중

<관심분야>

열전달, 대체냉매 및 냉동