

자연냉매 (R-290)를 이용한 식품 냉동기

김 내 현 / 편집장

인천대학교 기계공학과(knh0001@incheon.ac.kr)

박 형 채

(주)세아 E&C (park3658@hanmail.net)

슬러시 제조기, 소프트 아이스크림 제조기, 식품 냉동용 쇼케이스 등 냉동식품 제조 또는 보관에 사용되는 식품 냉동기의 냉매로 소형의 경우는 R-12, 대형의 경우는 R-502가 사용되어 왔다. 이들 냉매는 CFC로 오존층 파괴 물질로 규정되어 더 이상 사용되지 못하고 R-12는 R-134a로, R-502는 R-404A로 대체되었다. R-134a와 R-404A는 HFC로 오존층 파괴 문제는 해결하였으나 지구온난화를 유발하는 물질로 규정되어 유럽 등지에서는 사용에 제한을 받고 있다. 따라서 유럽을 중심으로 R-290(프로판)을 냉매로 사용하는 식품 냉동기 제품들이 개발되고 있다. R-290을 위시한 탄화수소 냉매는 독성이 없으며 화학적으로 안정하고 기존 냉동유인 광유와의 호환성도 좋은 것으로 알려져 있다. 하지만 냉매의 가연성이 해결되어야 할 문제이다.

R-290 적용 아이스크림 냉동고

아이스크림 공급업체인 Unilever사는 오스트리아의 아이스크림 제조기 제조업체인 Haustechnik사와 Danish Technological Institute와 협력하여 R-404A용 아이스크림 냉동고에 R-290을 충전한 시료 50개를 제작하고 R-404A가 충전된 25개 시료와 함께 현장실험을 수행하였다¹⁾. 그림 1에 시료의 사진

이 나타나 있다. 이들 시료는 시드니 올림픽 기간 중인 2000년 9월 초부터 10월 말까지 시드니 올림픽 공원 내에서 시험되었다. 그 후 시드니와 브리스베인에 있는 백화점과 상점에서 2001년 7월까지 연속하여 시험된 후 수거되었다. 시험 기간 중 고내온도와 외기온도 그리고 소비전력량이 계측되었다. 표 1에는 올림픽 공원 내에서 시험된 시료의 평균 소비전력량 및 온도가 나타나 있다. R-290 냉동고의 경우 일평균 소비전력량이 2.9 kWh임에 비하여 R-404A는 3.6 kWh로 높게 나타났다. 외기와 고내온도의 차이는 R-290의 경우는 43.8℃이고 R-404A의 경우는 47.1℃로 R-404A가 다소 높다. 소비전력은 외기와 고내 온도차에 따라 변하게 되므로 공정한 비교를 위해서는 소비전력을 표준 조건인 고내온도 -20℃, 외기 25℃(온도차 45℃)에서의 값으로 환산할 필요가 있다. 환산된 일별 소비전력량은 R-290은 3.0 kWh이고 R-404A는 3.5 kWh로 R-290의 경우 14% 낮게 나타났다. 표 2에는 시드니와 브리스베인의 백화점 및 상점에서 측정된 데이터가 나타나 있다. 올림픽 공원과 마찬가지로 R-290 냉동고의 소비전력량이 적게 나타남을 알 수 있다. 표준 조건으로 환산하면 일별 소비전력량이 R-290은 2.8 kWh이고 R-404A는 3.1 kWh로 R-290의 경우 10% 낮게 나타났다.

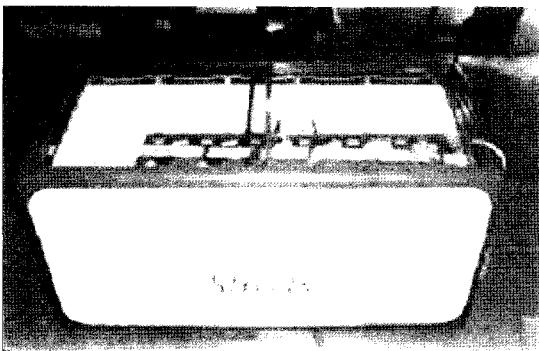


<표 1> 시드니 올림픽 공원에서 측정된 R-290 과 R-404A 아이스크림 냉동고 성능비교

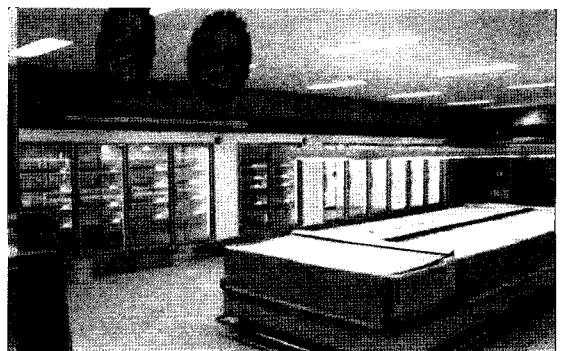
냉 매	일별 소비전력량	고내 온도	외기 온도	온도 차
R-290	2.9 kWh	-19.0℃	24.6℃	43.8℃
R-404A	3.6 kWh	-23.9℃	23.1℃	47.1℃

<표 2> 시드니와 브리스베인에서 측정된 R-290 과 R-404A 아이스크림 냉동고 성능비교

냉 매	일별 소비전력량	고내 온도	외기 온도	온도 차
R-290	2.6 kWh	-20.5℃	22.1℃	42.7℃
R-404A	3.1 kWh	-22.8℃	24.3℃	47.3℃



[그림 1] R-290 적용 아이스크림 냉동고



[그림 2] R-290/CO2 적용 쇼케이스

R-290/CO2 적용 슈퍼마켓 쇼케이스

덴마크에서는 2007년 1월 1일부터 충전량 10 kg을 상회하는 신규 냉동시스템에 HFC 냉매 사용이 금지된다. 따라서 슈퍼마켓 쇼케이스용 냉동시스템의 경우 기존 HFC를 대체할 냉매가 필요하게 되었고 Super Kol, Danish Technological Institute, COOP Denmark FDB에서는 R-290/CO2 캐스케이드 시스템에 대한 연구를 수행하였다²⁾. 그림 2에 이 시스템의 사진을 수록하였고 그림 3에는 개략도를 나타내었다. 이 시스템에서 R-290은 고온측(-14/25℃)을 순환하고 CO₂ (-32/-10℃)는 저온측을 순환한다. 그림 2에 나타나 있듯이 R-290은 두 개의 왕복동 압축기(C1과 C2)에 압축되고 공랭식 응축기(HX3)에서 응축된다. 두 냉매는 캐스케이드 열교환기(HX2)에서 열교환을 하는데 R-290이 증발하며 CO₂를 응축시킨다. CO₂는 슈퍼마켓의 저온 쇼케이스나 냉동고에 공

급되고 R-290은 브라인과 열교환을 한다(HX1). 브라인은 고온 쇼케이스나 냉장고에 공급된다(K1에서 K6). R-290과 CO₂ 압축기로는 흡입가스냉각형 반 밀폐식이 사용된다(C1, C2, C3). R-290을 포함하는 냉동시스템은 강제 환기가 되는 캐비닛 내에 장착된다.

R-290 시스템에는 두 개의 증발기가 장착된다. 그 중 하나는 캐스케이드 열교환기(HX1)이고 다른 하나는 브라인 냉각기(HX2)인데 모두 판형 열교환기를 사용한다. 두 열교환기에는 과열도 제어식 전자식 팽창밸브가 장착되어 냉매 순환량을 제어한다. R-290 압축기에는 오일펌프가 장착되어 있는데 윤활유로는 광유가 사용된다. 시스템에는 내부 판형 열교환기가 설치되어 액체 R-290의 과냉도와 압축기 입구 흡입가스의 과열도를 확보한다. CO₂ 시스템에서 캐스케이드 열교환기는 R-290의 증발열로 CO₂를 응축시킨다. 과열도 제어식 전자 팽창밸브를 통

과한 후 저온 쇼케이스나 냉동고에서 증발한 CO₂는 압축기로 유입된다. 이 시스템에도 오일 분리가 설치되어 있지 않다. 시스템을 순환하는 오일은 상대적으로 빠른 가스 유속으로 인하여 대부분 압축기로 재 유입된다.

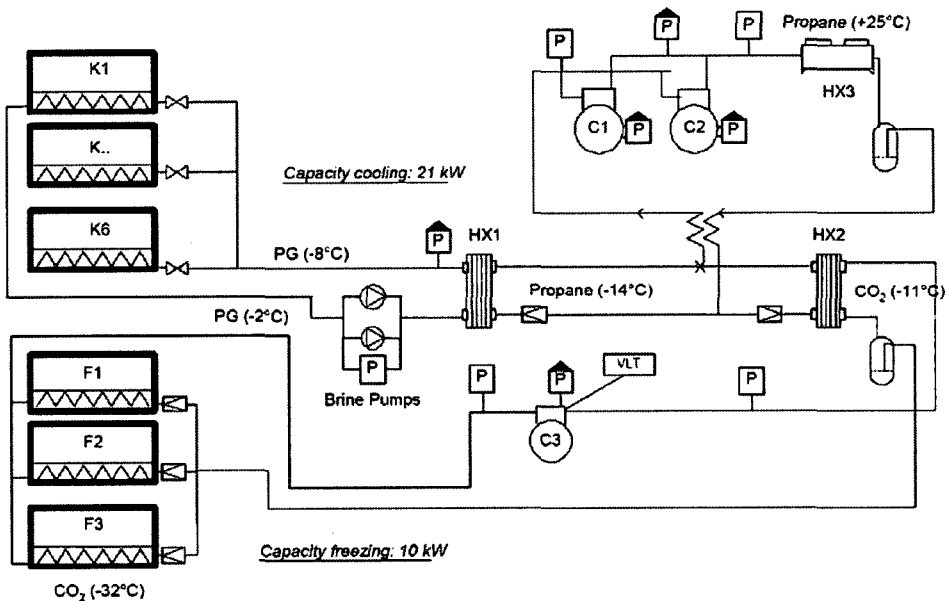
상기 R-290/CO₂ 시스템이 장착된 슈퍼마켓의 소비 전력량을 기존 R-404A 시스템이 장착된 8 곳의 슈퍼마켓 전력소비량과 비교한 결과 소비전력량은 R-290에서 5% 정도 적게 나타났다. 상기 R-290/CO₂ 시스템은 아직 초기 단계로 부품 및 시스템의 최적화가 이루어지지 않은 상태이다. 시스템의 최적화를 통하여 소비전력량을 더욱 줄일 수 있을 것이다.

R-290 적용 슬러시 제조기

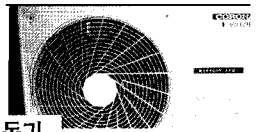
최근들어 국민 식생활 문화가 개선되고 생활수준이 향상됨에 따라 슬러시, 아이스크림과 같은 냉동 유제품의 소비가 급증하고 있다. 이들은 식품원액을 냉각시켜 제조되는데 식품 냉각에는 소형 냉동사이클이 사용된다. 슬러시 제조 냉동사이클의 특징은 모세관과 증발기에 있다. 에어컨이나 냉장고 등과 같은 일

반 제품은 모세관과 증발기가 하나인 반면 슬러시 제조기에는 다수의 모세관과 증발기가 사용된다.

그림 4에는 슬러시 제조기의 사진이, 그림 5에 냉동사이클의 개략도가 나타나 있고, 그림 6에는 증발기의 개략도가 나타나 있다. 증발기는 원통형으로 내측에 냉매가 흐르는 코일형 원관이 장착된다. 원통 외벽에는 냉매로부터 냉열을 받아 얼음이 형성되고 스크레이퍼가 회전하며 이 얼음을 깎아내어 슬러시를 만든다. 증발기의 전열 성능을 좋게 하기 위해서는 증발관과 원통사이의 접촉 열저항을 최소화 하여야 한다. 이를 위하여 전열 실리콘을 바르고 원통 내부에는 우레탄 폼을 발포하여 단열을 시킴과 동시에 증발관을 원통에 압착시킨다. 슬러시 원액은 유지방 10% 정도로 증발기 내부로 투입된다. 유지방 10%의 원액은 -2℃에서 슬러시로 변화하고 이 때 증발기 냉매의 온도는 슬러시가 형성됨에 따라 대략 -5℃에서 -17℃로 감소한다. 슬러시가 형성되면서 스크레이퍼에 걸리는 토크는 증가하게 되는데 이 토크 변화로부터 슬러시의 완성여부가 결정되고 완성은 압축기 가동을 중단한다. 슬러시가 녹아 스크레이퍼에 걸리는 토크가 감소하면 다시 압축기가 가동된다.



[그림 3] R-290/CO₂ 적용 슈퍼마켓 냉동사이클

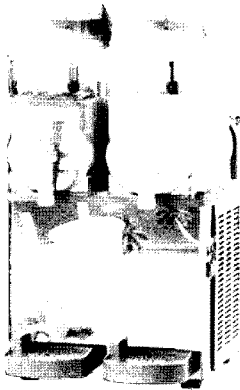


자연냉매 (R-290)를 이용한 식품 냉동기

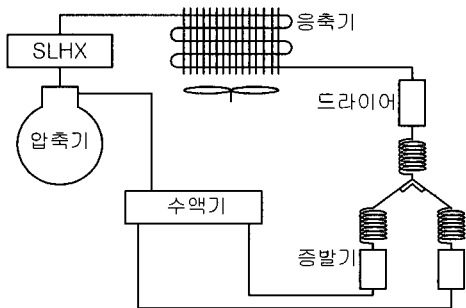
슬러시 제조기는 하나의 압축기로 두세개의 증발기를 가동시키는 멀티형으로 제작된다. 그림 5에 증발기 2개가 장착된 멀티형 슬러시 제조기의 개략도가 나타나 있다. 멀티형의 경우 팽창장치(모세관)의 개수는 증발기 개수보다 많다. 또한 멀티형에서는 증발기가 모두 작동할 경우, 하나만 작동할 경우, 둘만 작동할 경우등 여러 운전 조건이 존재한다. 증발기의 냉동능력은 모세관을 통과하는 냉매의 온도와 유량에 따라 좌우되는데 모세관이 둘 이상이 되면 이들이 서로 유량에 영향을 미치므로 냉동사이클의 설계가 까다롭게 된다. 슬러시 제조기의 경우 제조온도가 -2℃에서 너무 올라가면 얼음이 형성되지 않고 너무 내려가도 얼음성분이 너무 많아 맛이 떨어진다. 또한 실외에서 여름부터 겨울까지 판매가 가능하여야 하고 압축기 소비전력도 규제를 받는 등

설계조건에 제약이 많다.

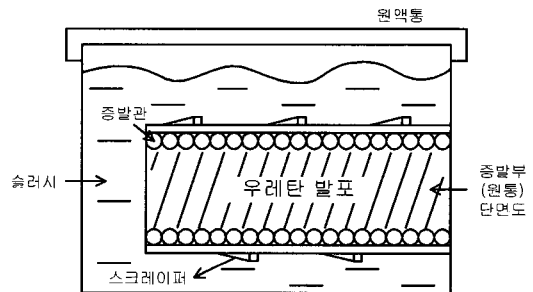
냉매로는 기존의 R-12 대신에 R-134a가 사용되고 있다. 하지만 R-134a도 지구온난화문제 (GWP=1,300)가 걸림돌이 되어 유럽을 중심으로 R-290(프로판)으로 개발이 추진되고 있다. R-290은 천연냉매로 GWP가 3이다. 표 3에 ASHRAE LBP 조건 (응축 온도 54.4℃, 증발온도 -23.3℃, 과냉 32.2℃, 과열 32.2℃)에서의 R-12, R-134a, R-290의 물성 및 사이클 특성을 나타내었다. 표 3에 나타나 있듯이 R-290의 증발압력은 R-134a보다 89% 높고 응축압력은 28% 높다. 또한 압축비는 32% 작다. R-290의 증발잠열은 R-134a에 비하여 90% 정도 커서 동일 냉동능력을 내기 위한 냉매의 질량유량은 R-134a의 53% 수준이며 압축기의 행정체적은 64% 수준이다. 압축기의 경우는 Danfoss, Embraco 등에서 R-290용을 생산하고 있다. R-290의 비등 및 응축 전열성능은 기존 HFC 냉매에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 증발기나 응축기를 소형화 할 수 있는 가능성이 있다. 팽창장치의 경우는 냉매의 체적유량은 두 냉매가 유사하나 R-290의 점성이 R-12에 비하여 작기 때문에 모세관의 길이를 늘이거나 직경을 감소시켜 압력을 조절할 필요가 있다. 또한 냉매의 특성상 기존 광유를 윤활유로 사용할 수 있어 부품과의 적합성 및 신뢰성 측면에서 큰 문제가 없어 보인다. 드라이어도 R-134a와 동일한 것을 사용할 수 있다. 냉매 봉입량은 기존 R-134a 시스템의 50% 수준이다. R-290을 슬러시 제조기에 사용하려면 가연성 문제가 해결되어야 한다. 슬러시 제조기에는 대략 100g의 프로판이 충전될 것으로 예상되는데 프로판의 자



[그림 4] 멀티형 슬러시 제조기



[그림 5] 멀티형 슬러시 제조기 냉동 사이클 개략도



[그림 6] 슬러시 제조기 증발기 및 원액통 개략도

<표 3> ASHRAE LBP 조건에서 냉매 및 사이클 특성

냉매	R-12	R-134a	R-290
화학식	CCl ₂ F ₂	CH ₂ FCF ₃	CH ₃ CH ₂ CH ₃
ODP	1.0	0	0
GWP(CO ₂ =1, 100년)	8500	1300	3
임계온도, °C	112	101	97
가연성	없음	없음	있음
응축압력 (54.5°C), kPa	1354	1470	1883
증발압력 (-23.3°C), kPa	133	115	217
압축비	10.2	12.77	8.71
증발잠열, kJ/kg	142	186	354
COP	2.91	2.90	2.88
냉매 질량유량(200 W), g/h	5070	3870	2034
행정체적 (3500 rpm), cc/rev	3.97	4.16	2.66
압축기 토출온도, °C	127	119	116
윤활유	광유	POE	광유
냉매비체적, dm ³ /kg	0.75	0.845	2.08
냉매체적유량, dm ³ /h	3.93	3.95	4.23

연발화온도가 470°C로 높고 점화가 가능한 프로판과 공기의 농도가 5.3 ~ 15.0 vol%이므로 냉매의 누출에 따른 폭발 가능성은 매우 희박해 보인다. 그러나 웨이크 제조기의 전기 부품을 함체 외부에 설치하는 등 부품에 대한 설계 변경이 필요하다. 잠재적인 점화원으로는 스파크, 전자파, 누설전류, 과열등이 있다. R-290 제품을 유럽에 수출하기 위해서는 가연성과 관련된 ATEX 인증이 필요하다. R-290 적용 슬러시 제조기 관련 기술은 다음과 같다.

(1) R-290 적용 기술

냉매가 바뀌게 되면 압축기, 응축기, 증발기, 모세관등 부품 설계가 달라지게 되고 압축기 오일과 부품과의 친화성, 독성/가연성도 검토되어야 한다. R-290에 대한 열물성, 열전달특성 평가와 더불어 냉동 시스템 해석기술의 개발이 필요하다.

(2) 요소부품 설계기술

• 멀티증발기 시스템 해석기술

슬러시 제조기에서는 하나의 압축기에 다수의 증발기가 설치된다. 멀티형의 경우 팽창장치(모세

관)의 개수는 증발기 개수보다 많다. 또한 멀티형에서는 증발기가 모두 작동할 경우, 하나만 작동할 경우, 둘만 작동할 경우등 여러 운전 조건이 존재한다. 증발기의 냉동능력은 모세관을 통과하는 냉매의 온도와 유량에 따라 좌우되는데 모세관이 둘 이상이 되면 이들이 서로 유량에 영향을 미치므로 냉동사이클의 설계가 까다롭게 된다.

• 증발기 설계기술

증발기는 원통형으로 내측에 냉매가 흐르는 코일형 원관이 장착된다. 원통 외벽에는 냉매로부터 냉열을 받아 얼음이 형성되고 스크레이퍼가 회전하며 이 얼음을 깎아내어 슬러시를 만든다. 이 경우 열전달 관계식은 잘 알려져 있지 않다.

• 응축기 설계기술

슬러시 제조기에는 핀-관 응축기가 사용된다. 환관 열교환기의 관 내측 및 공기측 전열 성능은 시험을 통하여 확보할 수 있다.

• 압축기 해석 기술

R-290 압축기 해석 기술 개발이 요구된다.

(3) 마이콤 제어기술



현재 슬러시 제조기는 냉사이클, 응축팬의 제어를 수동으로 기계식제어를 함으로써 제조효율이 감소하고 품질이 떨어진다. 이들에 대해 마이콤을 통한 온도대역별 제어를 함으로써 슬러시 제조효율의 극대화 및 품질 개선을 도모할 수 있다.

(4) 성능평가 기술

슬러시 제조기는 계절에 관계없이 작동하여야하고 그 설치 위치가 옥외가 될 수도 있으므로 여러 악조건에서도 성능이 유지되어야 한다. 현재 슬러시 제조기에 대한 성능평가기준은 KS 나 UL 규격에도 정해져있지 않다.

(5) 제조관련 기술

슬러시 제조기는 R-290을 사용할 경우 가연성 문제를 해결해야 한다. 가연성이 있는 냉매를 사용하는 냉장고나 냉동고의 안전사항은 TS 95006에 기술되어 있다. 또한 압축기 오일을 위시한 각종 부품들이 냉매와 부합되어야하는 등 제조와 관련하여 여러 사항을 고려하여야 한다. 또한 유럽 수출을 위해서는 ATEX 인증을 획득해야 한다.

결어

현재 식품냉동기에 사용되고 있는 HFC계 냉매는

지구온난화 유발 물질로 분류되어 유럽에서는 사용이 어려운 실정이다. 따라서 유럽을 중심으로 대체 냉매로 자연물질인 R-290(프로판)을 사용하는 식품 냉동기 개발이 이루어져 왔다. 이러한 추세에는 미국, 일본 등이 동참할 예정이고 우리나라도 조만간 같은 행보를 하지 않을 수 없을 것이다. 특히, 현재로서도 유럽에 수출을 하기 위해서는 R-290 제품을 생산할 수 밖에 없는 실정이나 중소기업의 기술력이 이에 못 미치므로 이를 극복하기 위하여 산학연관의 적극적인 지원이 요구되는 현실이다.

참고문헌

1. Elefsen, F., Nyvad, F., Gerrad, A. and Gerwen, R.-V., "Field test of 75 R404A and R290 ice cream freezers in Austrailia," EcoLibrium - Nov. 2003, pp. 24-27.
2. Christensen, K. G. and Bertilsen. P., "Refrigeration systems in supermarkets with propane and CO₂ - energy consumption and economy," EcoLibrium - Feb. 2004, pp. 26-32. 