

Low GWP 냉매 적용 셀-튜브형 증발기 개발

김 동 호 한국기계연구원 열시스템연구실 선임연구원
 변 호 원 한국기계연구원 열시스템연구실 선임연구원
 김 욱 중 한국기계연구원 열시스템연구실 책임연구원

| e-mail : dhkim@kimm.re.kr
 | e-mail : hwbyun@kimm.re.kr
 | e-mail : ojkim@kimm.re.kr

이 글에서는 Low GWP 냉매를 이용하는 셀-튜브형 증발기 개발 기술에 대해서 소개하고자 한다. 자세한 터보냉동기에 사용되는 만액식 증발기에 대한 기술 소개 및 향후 개발 연구에 대해 소개한다.

GWP 지수가 낮은 냉매의 개발과 함께 다양한 HVAC&R 기기의 개발이 요구되고 있다. 그 중 터보냉동기는 냉매 충전량이 많아 해외 선진사를 중심으로 신제품이 출시되고 있다. 이 글에서는 터보냉동기 구성 요소 중 냉매량이 많이 요구되는 되는 만액식 증발기에 초점을 맞춰 터보냉동기 개발의 필요성, 해외 선진사의 개발연구동향, 한국기계연구원에서의 연구 개발 내용 및 향후 개발 연구과제 등을 간략히 서술해 보고자 한다.

로 가장 빨리 접근되었던 시스템 중 하나는 터보냉동기이다. 터보냉동기는 다른 시스템에 대비하여, 상대적으로 많은 양의 냉매를 사용하는데, 이는 만액(滿液)식 증발기를 사용하기 때문이다. 만액식 증발기라 함은, 액체 상태의 냉매가 증발기를 가득 채우고 있기 때문에 많은 냉매 충전량을 필요로 한다. 물론, 터보냉동기 자체가 다른 냉동시스템에 비하여 냉동능력이 크게 설계되기 때문에도 많은 양의 냉매를 필요로 한다. 그림 1은 HVAC&R 시스템별, 일반적인 냉매

터보냉동기에서의 증발기

친환경 냉동시스템을 개발하는 것은 개발자의 의무이자 책임이다. 냉동시스템이 지구 온난화에 미치는 인자로는 직접적으로는 GWP가 높은 냉매의 사용이며, 간접적으로는 전기를 소모하기 때문이다. Low GWP 냉매의 개발과 함께 이를 적용하기 위한 대상으

Table 3.1: Typical Lifetimes, Charge Sizes, and Leakage Rates for HVAC&R Equipment

Equipment Type	Lifetime (yrs) ¹	Charge Size (kg) ²	Leakage Rate (%/year) ¹
Residential Refrigeration	20	0.15	0.5
Small Self-Contained Refrigeration	14	0.25	0.6
Large Self-Contained Refrigeration	14	2	0.6
Walk-in Refrigeration	20	20	20.0
Supermarket Refrigeration	15 - 20	1,500	7.8 - 29.9
Residential Air Conditioning	15	3.5	7.2 - 9.3
Commercial Air Conditioning	15	8.0	7.9 - 8.6
Centrifugal Chillers	20 - 27	720	2.0 - 10.9
Scroll/Screw Chillers	20	280	0.5 - 1.5

1. Source: Annex 3 - Methodological Descriptions for Additional Source or Sink Categories; Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2008; U.S. Environmental Protection Agency. Available at http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usggrnv_archive.html
 2. Source: EPA Vintaging Model

그림 1 HVAC&R 기기별 수명, 냉매 충전량, 누설량(W. Goetzler, et al., "Research & Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants," US DOE, 2014)

충진량 및 누설량을 나타낸다(W. Goetzler, et al., “Research & Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants,” US DOE, 2014).

냉동 시스템의 환경성을 평가하는 기술로는 LCCP(Life-Cycle Climate Performance)가 있으며, 이는 요소 인자가 미치는 환경성을 CO₂ 배출량으로 환산하는 기법이다. 예를 들어, 냉동시스템의 경우 크게는 ① 냉매누설에 의한 환산 CO₂ 배출량(Direct emission), ② 전력 사용량(Indirect emission)에 의한 환산 CO₂ 배출량으로 구분할 수 있다. ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 발표한 연구(W. Goetzler, et al., “Research & Development Roadmap for Next-Generation Low Global Warming Potential Refrigerants,” US DOE, 2014)에 의하면 기존 냉매의 경우, 냉매 누설에 의한 CO₂ 배출효과가 지배적이지만, Low GWP 냉매로 대체될 경우 누설에 의한 인자보다는 시스템 효율이 환경에 미치는 중요한 변수가 된다. 따라서, Low GWP 냉매를 사용하는 시스템에서의 고효율화는 친환경 시대를 위해 필수적이다.

터보냉동기는 다른 시스템에 비해 많은 냉매량을 필요로 하며, 냉매의 누설은 환경에 많은 영향을 미친다. Low GWP를 이용하는 친환경, 고효율의 터보냉동기 개발은 필수적이다.

해외 선진사 터보냉동기 개발 동향

현재까지 터보냉동기(Centrifugal chiller)는 작동유체를 R-123 및 R-134a를 주로 사용하였다. Low GWP 냉매 개발과 더불어 기존 냉매의 대체 냉매들이 개발되고 있으며, 대체 냉매들의 개발방향은 기존 냉매 대비 GWP지수가 낮지만, 비슷한 열물성을 가지도록 하는 것이다.

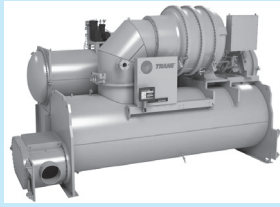
저압냉매로 분류되는 R-123을 대신하는 대체냉매로는 대표적으로 R-1233zd(E)가 있으며, 고압냉매인 R-134a의 대표 대체냉매로는 R-1234yf, R-1234ze(E)가 있다. R-1234yf 냉매의 경우, 차량용 HVAC에 적용되고 있으나, 다른 HFO 계열 냉매 대비 생산단가가 높아, 많은 냉매량을 충전하는 터보냉동기에는 사용되지 않고 있다. 언급한 대체냉매들은 올레핀계열의 HFO 냉매로서 GWP 지수가 10 이하이나, HFC 냉매 대비 대체로 비체적이 크다는 단점이 있다(D.H. Kim et al., “The latest review of Low GWP (<100) HFO Refrigerant and Studies on the Pool Boiling Heat Transfer,” Int. J. Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 24, 163009, 2016). 그림 2는 HFC 계열의 R-134a 냉매 및 HFO 계열의 냉매의 비교이다.

대표적인 터보냉동기 제작 업체 선진사인 Trane, MHI, Johnson Controls, Geoclima에서는 최근 신냉매를 이용한 터보냉동기를 개발하였으며, 각 회사마다 출시한 냉동기는 사용한 냉매가 다르나 크게는 R-1233zd(E) 및 R-1234ze(E)로 구분할 수 있다.

Comparison of R-134a and olefins for chiller

Refrigerant	HFC	Olefins	
	134a	1234ze(E)	1233zd(E)
Standard boiling point [°C]	-26.1	-19.0	18.3
Saturated pressure (@6°C)[kPaG]	260.7	167.3	-39.1
Saturated pressure (@38°C)[kPaG]	861.9	624.3	100.8
Saturated vapor specific volume (@6°C)[m ³ /kg]	0.056	0.069	0.277
Theoretical COP <small>*@ET=5, CT=38, η=0.9</small>	6.58	6.56	6.93
Price / R-1233zd(E) rated value	-	1.5	1

그림 2 HFC 대체 냉매(HFO)의 열물성 특성(R. Suemitsu et al., “Development of Centrifugal Chiller and Heat Pump Using Low GWP Refrigerant,” 12th IEA Heat Pump Conference, 2017)



Trane

R-1233zd(E)

R-514A(R1233mzz)



MHI

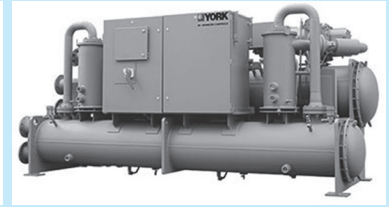
R-1233zd(E)

R-1234ze(E)



Geoclima

R-1234ze(E)



Johnson Controls

R-513A
(wt%, R-134a: 44,
R-1234yf: 56)

사용 냉매

그림 3 해외 선진사 Low GWP 냉매용 터보냉동기

Trane 사는 신냉매 R-1233zd(E)를 사용하는 터보냉동기를 최초로 개발하였으며, R-514A 냉매를 이용한 터보냉동기도 현재 개발 중이다. Trane 사를 이어, MHI 사도 R-1233zd(E) 터보냉동기를 개발하였으며, R-1234ze(E) 냉매를 이용한 터보냉동기도 올해부터 개발 중이다. R-1233zd(E) 터보냉동기의 경우, R-1234ze(E) 냉매 대비 열역학적 COP가 높고 가격 경쟁력이 있으며, 응축기에서의 압력이 상압에 가까워 고압 냉매 대비 누설이 없다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로, R-123 대체 냉매 R-1233zd(E)를 이용한 터보냉동기의 개발이 많이 이루어지고 있다.

Geoclima 사는 R-1234ze(E)를 작동유체로 사용하는 터보냉동기를 개발하였으며, Johnson Controls 사는 R-1234ze(E)의 혼합물인 R-513A를 이용한 터보냉동기를 개발하였다. 두 회사에서 개발한 증발기의 특징은 만액식 증발기가 아닌 Falling film 방식의 증발기를 채택하였으며, 이 증발기의 경우 만액식 대비 냉매 충전량을 획기적으로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 언급한 기술에 대해서는 나중에 다시 서술하기로 한다.

현재 많은 터보냉동기 해외 선진사들은 대체 냉매를 이용한 냉동기를 개발하였으며, 작동유체로는 크게 R-1233zd(E) 및 R-1234ze(E)로 구분할 수 있다.

한국기계연구원 전열관 개발 연구

터보냉동기 내 만액식 증발기는 셀-튜브 타입의 열교환기로 튜브 외측에서 냉매는 증발하게 되며, 이때 튜브 내측으로 냉수가 흐른다. 튜브 표면에서의 냉매 증발은

폴비등 열전달과 유사하다. 증발기의 총괄열전달 계수를 향상시키기 위해서는 ① 튜브 내 냉수 대류 열전달 계수 향상, ② 튜브 외측 비등열전달 계수 향상을 해야 하며, ①의 경우는 펌프 차압과 관련하여 얻을 수 있는 향상의 폭이 제한된다. 따라서, 튜브 외측 열전달을 향상시키는 연구가 선진 전열관 제조사에 의해 수행되고 있으며, 한국기계연구원에서도 관련 연구를 수행 중이다.

일반적으로, 비등열전달에 사용되는 튜브는 외부에 수많은 핀으로 구성이 되어 있으며, 핀-핀 사이에는 Cavity가 있어 증발한 기체냉매를 가두어 버블을 성장시켜 떨어져 나가도록 설계된다. 기본적인 핀의 설계 방향은 핀 개수를 증가시키도록 설계가 되나, 현실적으로 가공기술의 한계에 직면하여 무한정 증가시킬 수는 없다. 전열관의 주요 기하학적 인자로는, 핀 높이, 길이/원주 방향 핀 개수가 있으며, 한국기계

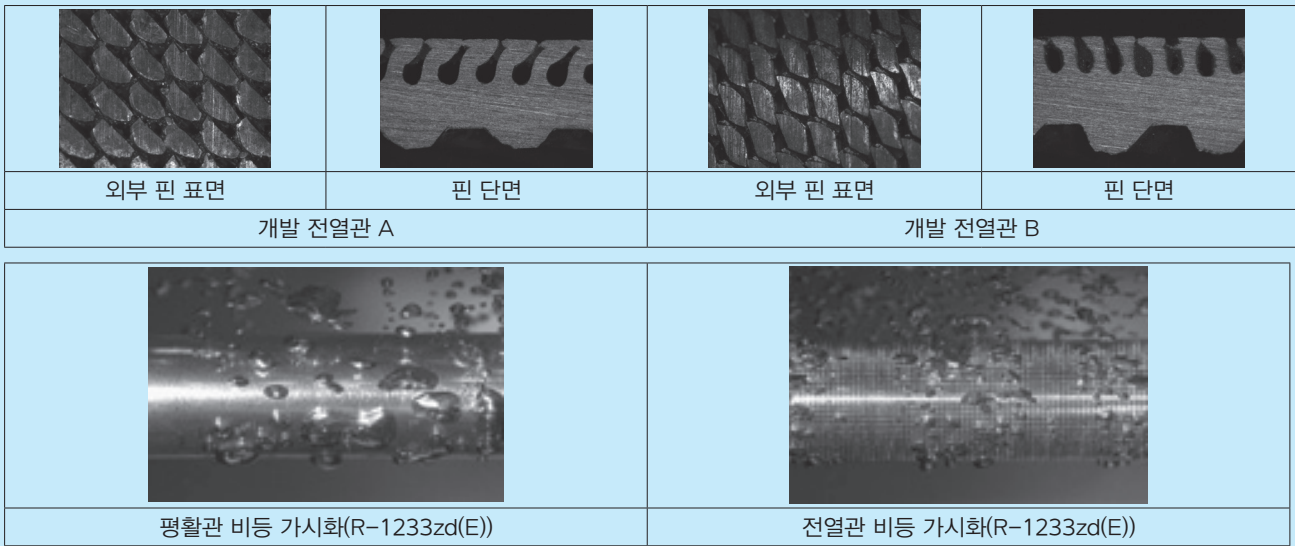


그림 4 개발전열관 형상 및 비등 가시화 사진

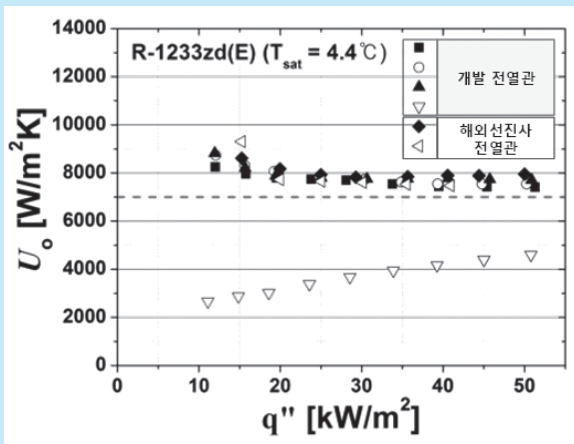


그림 5 개발 전열관의 성능 특성

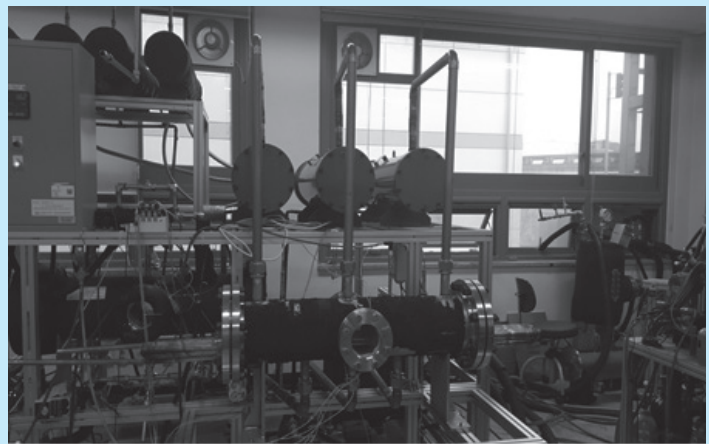


그림 6 증발기용 전열관 성능 평가 장치

연구원에서는 R-1233zd(E)용 증발기 전열관 개발 연구를 수행하고 있으며, 전열관 시험장치를 통해 전열관의 성능을 파악하고 있다. 그림 4는 개발한 증발기 전열관의 형상을 나타내며, 표면에서의 비등현상을 가시화 장치를 통하여 측정하였다.

전열관 시험장치를 통해 총괄 열전달 계수 및 냉수측 차압 특

현재 한국기계연구원은 R-1233zd(E)용 증발기 전열관을 개발 중이며, 개발한 전열관은 단관 성능 평가를 통하여 대용량 증발기 설계에 활용하고 있다. 현재 개발한 전열관은 해외 선진사 제품과 동등한 수준을 나타내나, 양산 과정에서 가공기술 개선이 필요하다

성을 구할 수 있으며, 총괄열전달 계수를 토대로 Wilson plot 방법을 활용하여, 관 외측 열전달 계수를 추정할 수 있다. 이때 얻은 관 외측 열전달 계수를 토대로 상관식을 개발하여 증발기 설계에 활용하게 된다. 위 결과는 한국기계연구원에서 개발한 전열관과 해외 선진사 전열관의 성능 비교이며, 개발한 전열관이

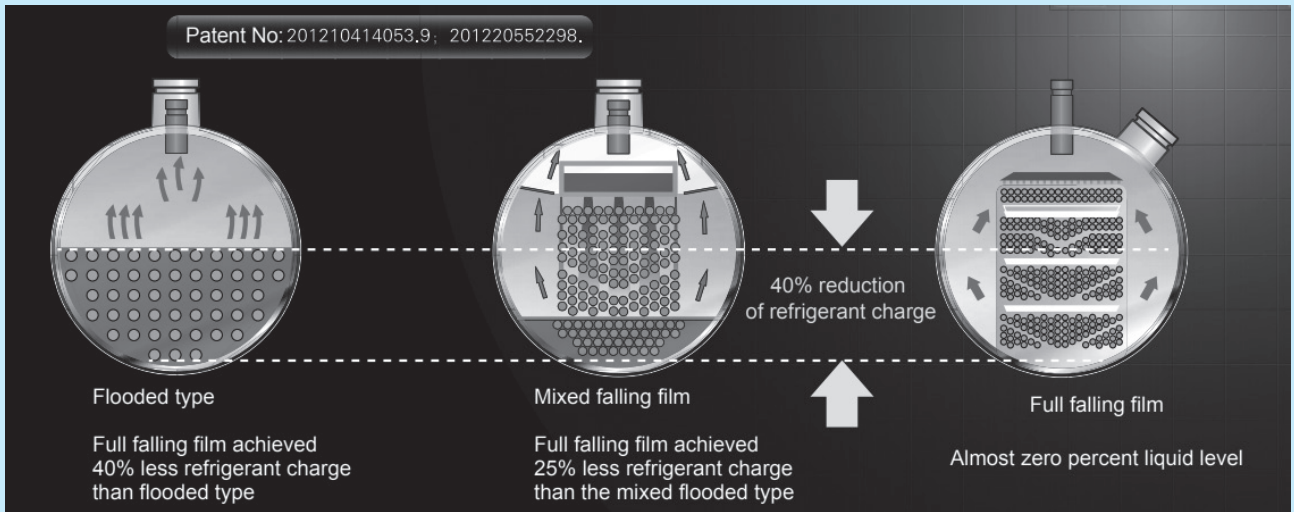


그림 7 Falling film 증발기 개념도(MIDEA, Full Falling Film Centrifugal Chiller, Available at <http://midea.kz/assets/files/pdf/r134a-full-falling-film-centrifugal-chiller.pdf>.)

R-1233zd(E) 냉매에서는 선진사 전열관에 유사한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 추후에는, 비등 가시화 영상을 기초로 버블의 크기, 버블 생성 주기 등을 Image processing하여 보다 면밀한 연구를 수행해 나아갈 예정이다.

증발기 관련 향후 연구 방향

터보냉동기에서 Low GWP 냉매 도입으로 인한 가장 큰 문제점은, 냉매 단가 상승에 따른 가격 상승이다. 만액식 증발기를 다른 방식으로 대체한다면, 냉매 충전량을 감소시킬 수 있으며 이에 관한 연구들이 해외 선진사 위주로 진행 중이다. 흔히, Dry expansion eva, Falling film eva로 표현이 되며, 응축기 출구의

만액식 증발기의 문제점인 많은 냉매 충전량을 해소하기 위한 방안으로 Film 증발 방식의 열교환기가 연구되고 있으며, 최적의 Film 두께, 튜브 및 셀 축 구조개선 연구가 향후 필요할 것이다

액상 냉매가 셀-튜브 상측으로 떨어지는 방식으로 만액식 증발기와는 차이점을 나타낸다. 그림 7은 Falling film 방식을 이용한 증발기의 개념도를 나타낸다.

Falling film 증발 열전달의 특성은, 관 표면 주변으로 적당량의 액막이 형성만 되면 그 이후에는 열전달 계수는 큰 변화가 없다. 따라서,

적당량의 액막이 형성되기 위한 최적의 냉매 충전량을 계산하는 연구가 필요할 것이며, 액적이 압축기 흡입 쪽으로 유입되는 것을 방지하기 위한 구조, 수직 방향으로의 균일 젖음도 개선을 위한 튜브 배열 구조에 대한 연구들이 향후 이루어져야 할 것이다.