

김민수 성균관대학교 기계공학부 대학원생

| e-mail : starsteam1@skku.edu

조금남 성균관대학교 기계공학부 교수

| e-mail : keumnamcho@skku.edu

이 글에서는 Low GWP(Global Warming Potential, 지구온난화지수) 냉매의 국내외 연구개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

GWP 및 LCCP

ODP(Ozone Depletion Potential, 오존층파괴지수)란 오존층 파괴에 영향을 미치는 척도로서, CFC-11 냉매를 기준으로 하여 동일 질량에 대해서 영향도를 평가한다. CFC(Chloro Fluoro Carbon) 냉매들은 대개 ODP 값이 1이며, HCFC(Hydro Chloro Fluoro Carbon) 냉매들의 ODP는 0.055 정도이다. 현재 많이 사용되고 있는 HFC(Hydro Fluoro Carbon) 계열 냉매의 경우 ODP는 대부분 0이다. GWP(Global Warming Potential, 지구온난화지수)

란 온실기체가 지구온난화에 얼마나 영향을 주는지 나타내는 척도로서, 대기 중에 방출된 1kg의 기체를 이산화탄소 1kg과 비교하였을 때 가열 효과가 어느 정도인지를 평가한다. 100년을 기준으로 이산화탄소의 GWP는 1이며, 가정용 에어컨 및 히트펌프에서 많이 사용되는 R-410A의 경우 2,088, 자동차 공조 시스템에서 사용되고 터보 냉동기에도 사용되는 R-134a의 경우 1,400으로 비교적 높은 GWP 값을 나타낸다. R-410A 및 R-134a와 같은 HFC 계열 냉매들은 높은 GWP로 인해 단계적인 사용 중단이 고려되고 있다. 그림 1, 2에 나타난 바와 같이 HFC 계

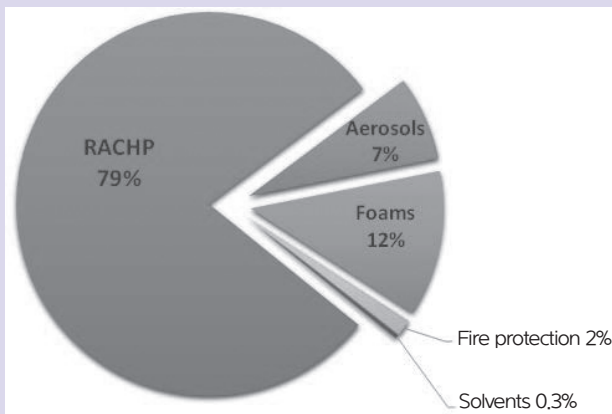


그림 1 HFC 계열 냉매 시장 비율(2012년)

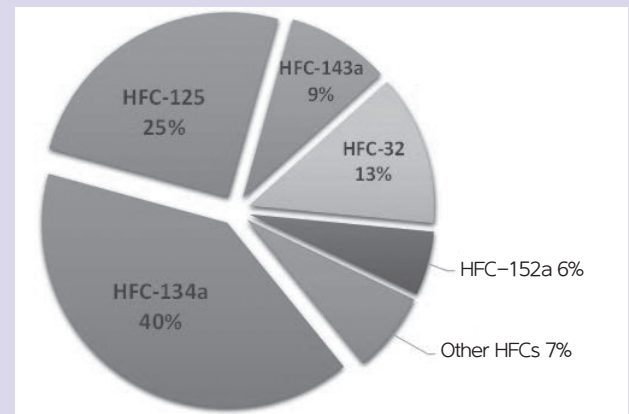


그림 2 전 세계 HFC계열 냉매 사용 현황(2012년)

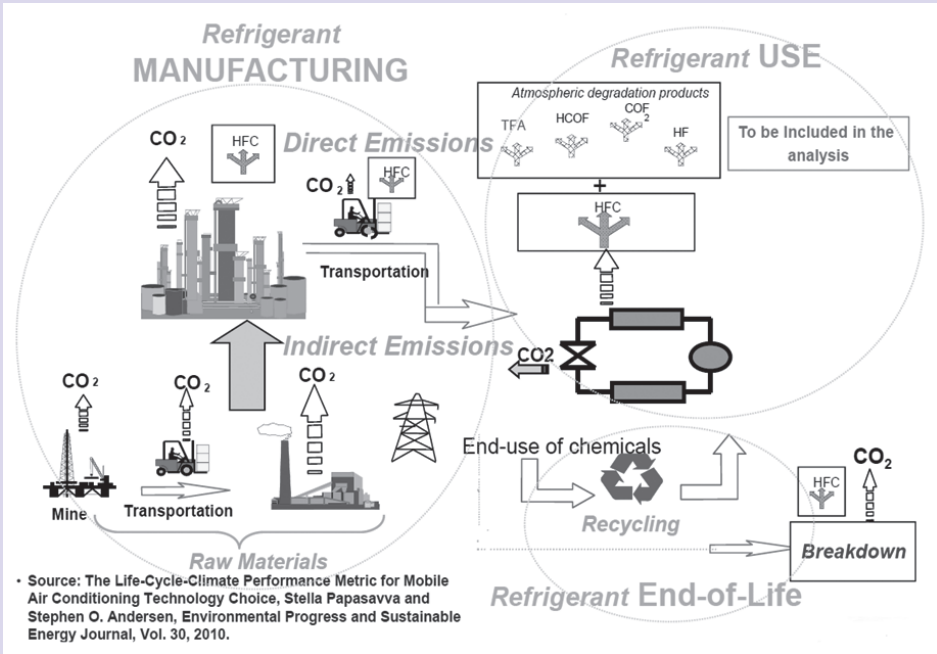


그림 3 자동차 냉동시스템의 Life Cycle Climate Performance (LCCP)

열 냉매들이 현재 냉동 공조 시장에서 가장 많이 사용되고 있으며, 그 중 R-134a의 사용량이 가장 많다.

LCCP(Life Cycle Climate Performance, 전주기 기후성능)란 GWP뿐만 아니라 물질(냉매)이 만들어지기까지 사용되는 에너지 및 물질(냉매)을 사용하면서 소모하는 에너지 등 더 넓은 범위에서 물질(냉매)에 대한 안전도, 성능, 환경성, 경제성 등을 나타내는

지표이다. LCCP는 냉매 누설에 의한 직접적 영향 및 에너지 소비에 의한 간접적 영향을 더해서 계산한다. R410A가 3.5kW 용량의 히트펌프에서 15년간 사용될 경우 직접적 영향 541, 간접적 영향 1만 3,410으로 총 1만 3,951의 LCCP 값을 나타낸다. 자동차 냉동시스템 냉매에 대한 LCCP는 그림 3과 같다.

냉매 안전성

냉매 가연성 관련 규격은 2014년에 개정된 ISO 817, 2013년에 개정된 ASHRAE 34를 따르고 있으며 Lower Flammable Grade인 A2L과 B2L이 추가되었다. 현재 유력한 대체냉매 후보로서 거론되고 있는 대부분의 냉매들은 A2L 등급이며, 기존 냉매들의 경우 대부분 가연성이 없기 때문에 대체냉매들의 안전성에 대한 우려들이 나오고 있다. 가연등급별 주요 특성은 표 1과 같다.

표 1 냉매 가연등급

		Lower Flammable Limit (@23°C, 101.3kPa)	Heat of Combustion (@23°C, 101.3kPa)	Burning Velocity (@23°C, 101.3kPa)	Flame Propagation (@60°C, 101.3kPa)	종류
A1	No Flame Propagation	-	-	-	No	R22 R410A
A2L	Lower Flammable	≥3.5% Vol ≥3.5% Vol	<19,000kJ/kg <19,000kJ/kg	≤10cm/s	Exhibit	R32 R1234yf
A2	Flammable			-	Exhibit	R152a
A3	Higher Flammable	<3.5% Vol	≥19,000kJ/kg	-	Exhibit	R290 R600a

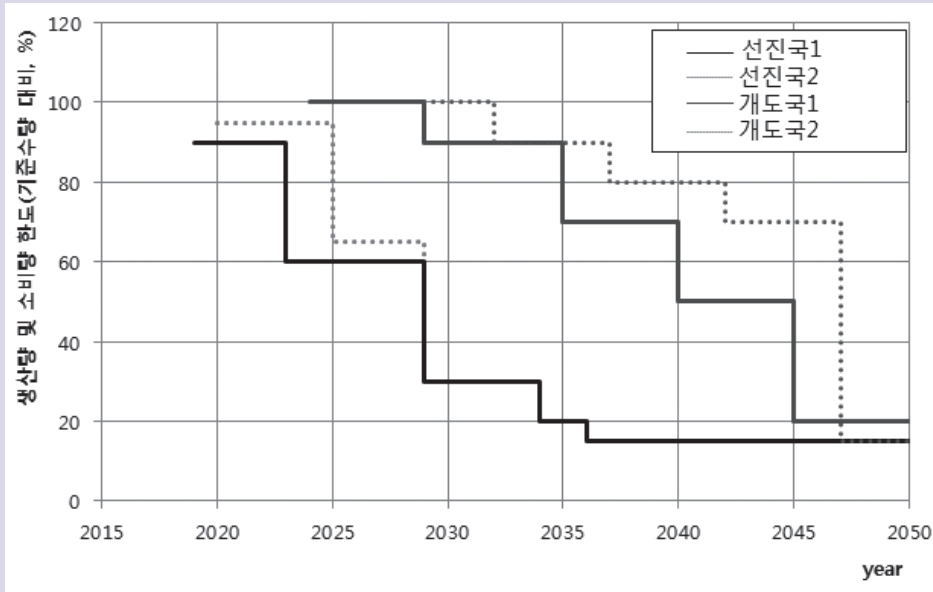


그림 4 Kigali 개정 의정서의 HFC 계열 냉매 감축 계획

냉매 누설의 경우 한국에서는 고압가스 안전 관리법, 대기환경 보전법에 따라서 20RT 이상, 충전량 50kg 이상의 냉동 시스템은 주기적인 누설점검 및 보고를 하게 되어 있다. 유럽의 경우 F-Gas 규제를 따라서 충전량을 이산화탄소로 환산한 기준으로 주기적인 누설 보고를 하게 되어있고, 미국은 EPA Section 608을 따라 충전량 50lb 이상의 경우 주기적인 누설 보고를 한다.

HFC 냉매 규제 동향

2016년 10월에 아프리카 Rwanda의 Kigali에서 열린 제28차 몬트리올 의정서 회의를 통해 전 세계 200여 개 나라가 HFC 계열 냉매의 사용을 제한하기로 합의했다. 이 합의에 따라 미국과 유럽 대부분 국가들은 2019년까지 사용량의 10%를 감축하는 것으로 시작해 2036년에는 85%를 감축한다는 목표를 세웠다. 개발도상국의 경우 2024년부터 감축을 시행하며, 고온지역 국가 및 경제 발전에 시간이 더 필요한 몇몇

국가들은 2028년부터 온실가스 사용을 줄이기로 합의하였다.

유럽연합에서는 F-gas Regulation을 적용하여 GWP 2,500 이상의 HFC 계열 냉매 및 적용 시스템을 2020년에 판매 금지하기로 계획하였고, 2022년에는 GWP 150 이상의 HFC 사용 시스템을 판매 금지하기로 하였다. 그 외에도 북미에서는 EPA(Environmental Protection Agency)를 통해 HFC 냉매 규제를 강화

하고 있고, 일본에서는 METI(Ministry of Economy, Trade and Industry)의 주도하에 HFC 냉매 규제를 적용하고 있다. Kigali 개정 의정서의 HFC 계열 냉매 감축 계획을 연도별로 나타내면 그림 4와 같다.

HFC 냉매의 대체냉매 후보

HFC 계열 냉매에 대한 규제가 점점 강화됨에 따라 대체냉매의 필요성이 점점 증가하면서 최근 HFO(Hydro Fluoro Olefin) 계열 냉매가 낮은 GWP와 안정된 성능으로 인하여 유망한 대체냉매로 주목받고 있다. HFO 계열 냉매에 대한 관심은 자동차 에어컨 시스템의 지구온난화 가스 배출을 줄이기 위한 노력으로부터 시작되었다. R-1234yf는 자동차 에어컨에서 사용되고 있던 R-134a를 유럽의 경우 신차의 경우 2011년부터 대체 적용하기 시작하였고, 전 세계 자동차 업체들이 R-1234yf 냉매로 교체 적용 준비를 완료하였다. R-134a와는 달리 R-1234yf는 매우 낮

표 2 R-410A의 대체냉매 후보 HFO 계열 비공비 혼합냉매

제조사	냉매	GWP	질량분율 (%)						
			R32	R1234ze	R1234yf	R125	R152A	R600	R744
Honeywell	R455A	145	21.5		75.5				3
Chemours	R454C	239	21.5		78.5				
Chemours Daikin	R454A	250	35		65				
Honeywell	R444B	295	41.5	48.5			10		
Honeywell	R446A	461	68	29				3	
Chemours Daikin	R454B	466	68.9		31.1				
Honeywell	R447A	572	68	28.5		3.5			
Honeywell	R450A	604	58	42					
Honeywell Chemours Daikin	R452B	698	67		26	7			

은 GWP를 갖고 있으며, 이는 다른 HFO 계열 냉매들도 갖고 있는 공통적인 특성이다. 그러나 HFO 계열 냉매들은 통상적인 냉동시스템에서의 포화온도 조건에서 낮은 압력 특성을 나타내기 때문에 가정용 에어컨과 히트펌프에는 적합하지 않다. 그래서 많은 HFO 계열 혼합냉매들이 R-410A 냉매의 대체냉매 후보로서 개발 및 평가되고 있다. R-134a의 경우 자동차용 냉동 시스템에서 R-1234yf로 대체되어 이미 적용되고 있고, 터보냉동기에서도 고압용 경우 R-134a 냉매 대체로 R-1234ze(E)가, 저압용 경우 R-123 대신 R-1233zd(E)가 유망한 대체 냉매 후보이다. 현재까지의 연구결과로 보면 HFO 계열 냉매들은 HFC 대비 성능이 약간 낮긴 하지만 특성이 비슷하고 GWP가 현저하게 낮기 때문에 대체냉매로 적합하다는 평가를 받고 있다. 현재 미국의 Trane사와 Carrier사, 덴마크의 Danfoss사, 일본의 Mitsubishi사 등은 R-1234ze(E)와 R-1233zd(E)를 적용한 터보 냉동기를 개발한 상태이다.

가정용 에어컨 및 히트펌프에서 사용되는 R-410A의 경우 HFO 계열 냉매를 포함한 비공비 혼합냉매들이 유망한 대체 냉매로서 거론되고 있다. HFO 계열 비공비 혼합냉매들은 R-32를 주로 포함하고 있으며,

R-1234ze(E)나 R-1234yf 냉매도 일부 혼합된 형태를 나타낸다. R-32의 경우 성능은 좋지만 GWP가 675로 비교적 높기에 GWP가 낮은 HFO 계열 냉매를 혼합하여 GWP가 낮은 냉매를 제조한다. 이를 위해서 좋은 성능과 낮은 GWP를 갖는 냉매를 만들기 위해서 혼합비율을 바꿔가며 냉매를 개발하고, 성능시험을 통해 대체냉매로서의 적합도를 판단한다. 비공비 혼합냉매의 경우 400번 대의 번호로 표시되는데 서로 다른 성분들이 혼합되어 있기 때문에 각 성분마다 증발 및 응축이 일어나는 온도의 차이가 있다. 비공비 혼합냉매의 증발이나 응축이 시작되는 온도와 끝나는 온도의 차이를 GTD(Gliding Temperature Difference, 구배 온도차)라 한다. R-410A의 경우 비공비 혼합냉매이지만 GTD가 0.1℃ 정도로 매우 작다. 하지만 HFO 계열 비공비 혼합냉매들은 GTD가 약 2~7℃로 비교적 높은 값을 보인다. 때문에 GTD에 의한 열전달 특성 변화에 주목해서 시스템을 최적화해야 할 필요가 있다. 또한 냉매가 누설되면서 냉매의 성분이 달라지기 때문에 재충전 시 모든 냉매를 회수한 후에 새로운 냉매를 충전해야 하는 단점도 존재한다.

상업용 냉동시스템에서 많이 사용되는 R-404A의 경우도 R-410A와 마찬가지로 HFO 계열 비공비 혼

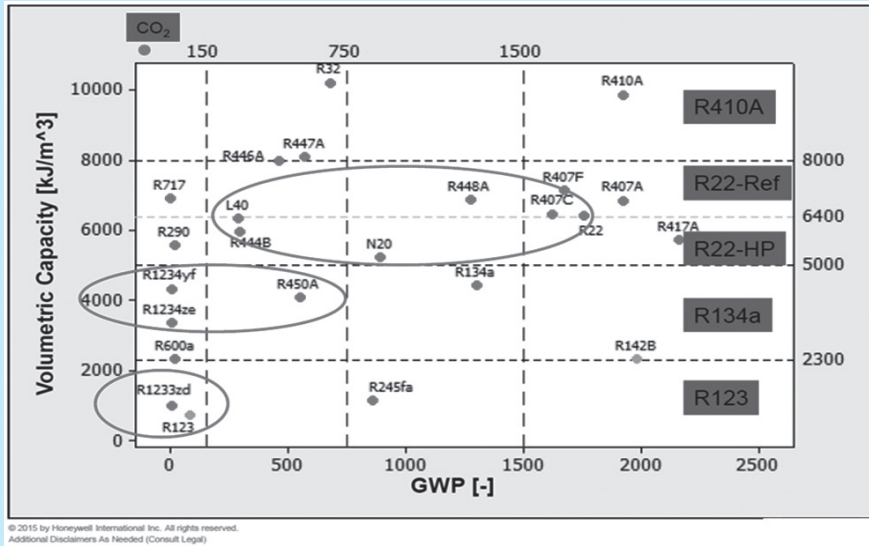


그림 5 주요 냉매 GWP 및 체적당 능력

합냉매들이 유망한 대체 냉매로서 거론되고 있으며, R-32의 경우 R-404A와 R-410A 냉매에 대한 대체 냉매로 거론되고 있다. HFO 계열 비공비 혼합냉매들은 미국의 Honeywell 사, DuPont 사를 인수한 Chemours 사 등이 주로 제조하여 판매하고 있다. R-410A 대체 후보 HFO 계열 비공비 혼합냉매들은 표 2에 나타나 있다.

주요냉매의 GWP와 체적당 능력을 그림 5에 나타내었다.

비공비 혼합냉매의 단점들 때문에 순수냉매인 R-32를 R-410A의 유망한 대체냉매로 고려하고 있기도 한다. 일본 Daikin 사에서 R-32를 적용한 가정용 및 소형 상업용 제품을 출시하였고, R-410A 적용 제품 대비 약 105%의 효율, 필요 냉매량 약 70%의 고효율 제품이다. GWP 또한 R-410A의 30% 수준이기 때문에 환경성에서도 좋은 평가를 받고 있다. 하지

만, 몬트리올 의정서에서 감축 대상 물질로 지정된 상태이기 때문에 일시적인 대안일 뿐이다. 때문에 앞으로도 대체 냉매에 대한 연구 및 개발이 계속해서 활발하게 진행될 예정이다.

미국 냉난방공조 협회인 AHRI(Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute)에서는 새롭게 개발되는 냉매들에 대해서 지속적인 AREP(Alternative Refrigerants Evaluation Program)를 진행하여, 대체냉매들에 대한 평가를 수행한다.

현재 사용되고 있는 냉매들의 대체 냉매 후보들을 선정하고, 많은 업체들과 함께 drop-in test를 수행해서 현재 사용되고 있는 냉동시스템에서 어떤 특성을 보이는지, 그리고 약간의 최적화를 통해서 성능 개선이 가능한지를 판단한다. 2011년에 시작한 AREP는 Phase I에서 38개의 냉매에 대한 시험을 수행하였고, Phase II에서는 새로 선정된 냉매들 및 Phase I에서의 냉매들을 추가 실험하여 총 51개의 냉매에 대한 시험을 마쳤다. 하지만 아직까지도 어떤 냉매가 현재 사용되고 있는 냉매들을 대체할 지 정해지지 않았고, 요소기술에 적용하기 위한 근본적인 연구들은 부족한 실정이다.

앞으로도 Low GWP 냉매에 대한 필요성 및 관심은 계속해서 높아질 것이고, 이에 대응하여 국내에서도 많은 관심을 갖고 대체 냉매에 대한 활발한 연구를 수행해야 할 것이다.