

HFCs 배출량 감축을 위한 정책 옵션별 장기 시나리오 탐색

노민영* · 김학영** · 윤소원***†

*온실가스종합정보센터 연구원, **온실가스종합정보센터 연구사, ***온실가스종합정보센터 연구관

Exploring long-term scenarios for hydrofluorocarbon reduction policy options in South Korea

Roh, Minyoung* · Kim, Hakyoung** and Yoon, Sowon***†

*Researcher, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Cheongju-si, Korea

**Assistant Researcher, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Cheongju-si, Korea

***Senior Researcher, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, Cheongju-si, Korea

ABSTRACT

Ozone-depleting substances (ODSs) have been regulated under the Montreal Protocol, leading to a phased reduction in the consumption of chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs). However, their substitutes, hydrofluorocarbons (HFCs), contribute significantly to greenhouse gas emissions due to their high global warming potential (GWP). This study evaluates the effectiveness of HFC reduction policies and quantifies their impact on the reduction in HFC consumption and emissions of products used as ODS substitutes. The results show that under the Montreal Scenario, a sharp reduction in HCFC consumption increases reliance on HFCs, causing emissions to continue rising until 2045 due to accumulated historical consumption. Under the Kigali Scenario, emissions peak in 2036 and begin to decline thereafter. Nonetheless, the projected emissions in 2036 remain approximately 2.5 times the 2018 level, indicating that achieving meaningful mitigation will require more proactive reductions beyond the Kigali schedule. Scenarios involving transitions to low-GWP substances—such as Transition, Retirement, and Enhanced Retirement—achieve greater reductions by promoting low-GWP alternatives and accelerating the phase-out of equipment containing high-GWP substances. Despite these improvements, maintenance-related HFC demand from refrigerant leakage remains a major barrier to mitigation efforts. These findings highlight the importance of expanding measures that address both new HFC consumption and maintenance-related refrigerant use. Proactive transition to low-GWP alternatives is essential for mitigating HFC emissions. Integrating these transitions with the early replacement of existing high-GWP equipment can further enhance mitigation effectiveness in the ODS substitute sector.

Key words : Ozone-Depleting Substances (ODS), Hydrofluorocarbons (HFCs), Montreal Protocol, Kigali Amendment, Greenhouse Gas Emissions, Refrigerant Management

1. 서론

오존층 파괴물질(ODS, Ozone Depleting Substances)은 염화불화탄소(CFCs), 수소염화불화탄소(HCFCs) 등을 포

함하며, 냉매(에어컨, 냉장설비, 공조설비 등), 발포제, 소화제 등 다양한 산업 분야에서 사용되어 왔다. 그러나 이러한 물질은 오존층 파괴의 주요 원인으로 작용함에 따라, 1987년 몬트리올 의정서를 통해 규제 대상에 포함되

†Corresponding author : swyoun@korea.kr (Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 5F Osong Bio Plaza, 227 Osongsaebyeong 8-ro, Osong-eup, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28222, Korea. Tel. +82-43-714-7595)

ORCID 노민영 0000-0002-0592-9199 김학영 0009-0001-0272-2010

윤소원 0009-0003-0164-529X

Table 1. HFCs phase-down schedule under the Kigali amendment

Party	Article 5 Parties: Group 1 (A5-1)		Article 5 Parties: Group 2 (A5-2)		Non-Article 5 Parties: Group 1 (NA5-1)		Non-Article 5 Parties: Group 2 (NA5-2)	
Country	The majority of Article 5 Parties *Including South Korea		Bahrain, India, Iran, Iraq, Kuwait, Oman, Pakistan, Qatar, Saudi Arabia, and the United Arab Emirates		The majority of Non-Article 5 Parties		Belarus, the Russian Federation, Kazakhstan, Tajikistan and Uzbekistan	
Baseline	Average production·consumption of HFCs in 2020, 2021, and 2022 plus 65% of HCFCs baseline production·consumption		Average production·consumption of HFCs in 2024, 2025, and 2026 plus 65% of HCFCs baseline		Average production·consumption of HFCs in 2011, 2012 & 2013 plus 15% of HCFCs baseline production·consumption		Average production·consumption of HFCs in 2011, 2012 & 2013 plus 25% of HCFCs baseline	
HFCs Reduction Step	2024	Freeze	2028	Freeze	2019	10%	2020	5%
	2029	10%	2032	10%	2024	40%	2025	35%
	2035	30%	2037	20%	2029	70%	2029	70%
	2040	50%	2042	30%	2034	80%	2034	80%
	2045	80%	2047	85%	2036	85%	2036	85%

Source: UNEP (2016)

었다. 이로 인해 우리나라는 2010년에 CFCs 소비를 전면 금지하고, 2015년부터 HCFCs 소비를 단계적으로 감축하여 2030년까지 완전 퇴출을 목표로 하고 있다(UN Environment Programme, 2020).

한편, 수소불화탄소(HFCs)는 ODS 대체물질로 널리 사용되었으나, CO₂보다 수백에서 수천 배 높은 지구온난화지수(GWP)를 지녀 1997년 교토의정서에서 6대 온실가스로 지정되었고 2016년 몬트리올 의정서를 개정한 키갈리 개정안에서도 규제 대상으로 포함된다. Table 1에 제시된 NA5-1 당사국은 유럽, 일본, 미국 등 선진국이 포함되며, 이들은 2019년부터 HFCs 소비감축을 시작했다. 우리나라가 속한 A5-1 당사국에는 중국, 브라질, 인도네시아 등 개도국이 포함되며, 해당 당사국은 선진국보다 10년 늦은 2029년부터 감축을 이행할 예정이다.

NA5-1에 속한 유럽은 「F-gas 관리법」을 제정하여 키갈리 개정안과 별도로 자국 내 HFCs 배출량 감축에 적극적으로 노력하고 있다. 「F-gas 관리법」은 몬트리올 의정서 이행 과정에서 감소된 CFCs가 HFCs 소비로 전환되며 증가한 F-gas 배출량을 줄이기 위해 도입되었다. 특히, 2024년에는 강화된 개정안(EU 2024/573)이 확정되었으며, 이를 통해 HFCs의 시장 허용량을 점진적으로 감축하여 2050년까지 완전 퇴출하는 것을 목표로 하고 있다(EU, 2024; Kim, 2022). 또한, 일본은 2015년 「프레온류 배출

억제법」을 제정해 HFCs의 제조 및 수입을 제한하고, 사용 후 HFCs 회수와 처리를 의무화하여 배출량 억제에 나서고 있다(MOE Government of Japan, 2016). 미국은 2020년 「American Innovation & Manufacturing (AIM) 법」을 도입하여 HFCs 감축을 본격적으로 추진하고 있으며, 2036년까지 HFCs의 생산 및 소비를 85% 줄이는 것을 목표로 하고 있다(EPA, 2025).

우리나라도 키갈리 개정서 이행을 위해 「오존층 보호 등을 위한 특정물질의 관리에 관한 법률」을 개정(MOTIE, 2022), HFCs를 제2종 특정물질로 추가하였다. 그러나 키갈리 개정서 일정에 따라 HFCs 소비는 감소될 것으로 예상되지만, 온실가스 산정 지침 변경의 영향으로 배출량은 당분간 지속 증가가 예상된다. 2024년 처음 적용된 2006 IPCC 지침(이하, 06지침)은 기존 1996 IPCC 지침(이하, 96지침)과 산정 방식 및 대상의 차이로 인해 ‘ODS 대체물질의 사용’ 부문(이하, ODS 부문) 배출량에서 큰 변화를 보였다. 2021년 기준 ODS 부문 배출량은 96지침은 7.1백만톤CO₂eq, 06지침은 29.4백만톤CO₂eq으로 06지침 적용 후 배출량이 약 4배 증가했으며, 국가 총배출량에서 차지하는 비중은 1%에서 4%로 확대되었다. 이는 06지침에서 HFCs 사용 제품의 수명을 고려하여 배출량을 누적 산정하고(GIR, 2024a), 산정 대상 물질을 키갈리 개정서 이행을 위해 2종에서 29종으로 확대했기 때문이다(Joint

Ministries, 2024). 이에 대해서는 2장에서 자세히 다룰 예정이다.

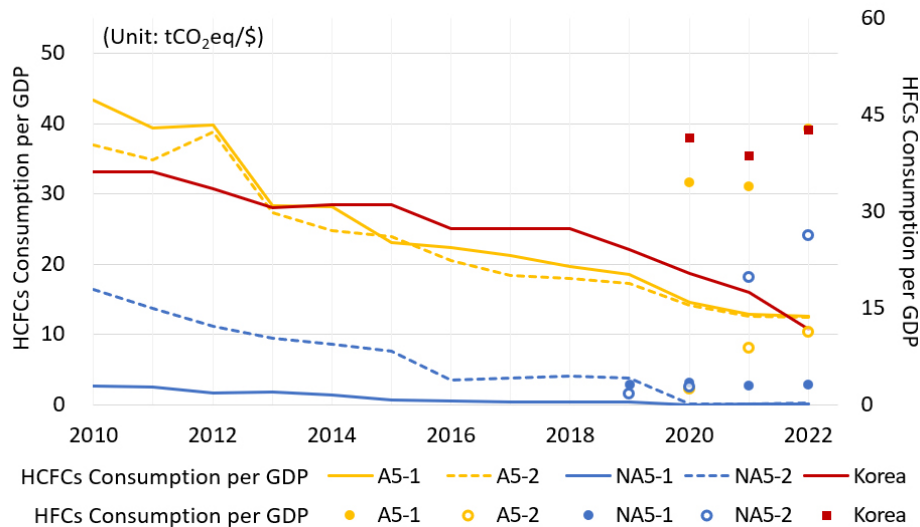
이러한 배출량 증가는 국가 온실가스 감축 목표(NDC, Nationally Determined Contribution) 달성에 어려움을 초래할 수 있다. 이에 대응하여 정부는 「온실가스 감축을 위한 수소불화탄소 관리제도 개선방안」(이하, 관리제도; Joint Ministries, 2024)을 발표하였다. 관리제도는 △고 GWP 물질의 저GWP 물질 전환, △냉매 사용 및 누출 관리 강화, △재생 냉매 사용 확대, △제도적 기반 확충 등 전반적인 정책을 포함하고 있다. 특히, 저GWP 물질 전환 정책은 국내 최초로 시행되는 것으로, 대체물질 개발 지원 및 인센티브 확대 등을 통해 2027년부터 본격적으로 시행될 예정이다.

본 연구는 국내 HFCs 소비 및 배출에 영향을 미치는 국제정책(몬트리올 및 키갈리 개정서)과 국내에서 시행

예정인 관리제도의 일부인 고GWP 물질 전환 정책의 감축 효과를 분석하고, 주요 정책적 시사점을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 제2장에서는 국내 HFCs 소비 및 배출 현황을 살펴 보고, 제3장에서는 정책 옵션별 감축 효과를 살펴보기 위한 시나리오 및 전망 방법론을 제시한다. 제4장에서는 시나리오 분석 결과를 논의하며, 제5장에서는 연구 결과를 바탕으로 정책적 시사점과 향후 방향성을 제안한다.

2. 국내 HFCs 소비·배출 현황

Fig. 1은 키갈리 개정서에 따른 그룹별 GDP 대비 HCFCs 및 HFCs 소비량을 나타낸다. 국내의 GDP당 HCFCs 소비량은 2018년 이후 연평균 23% 감소하여, 우리나라가 속한 A5-1의 연평균 감소율 12%보다 훨씬 빠르게 감소하는 경



*Excluding South Korea's domestic consumption from the A5-1

**Based on consumption data (UNEP, 2024) and GDP data (World Bank, 2024) compiled by the author

Fig. 1. Status of HCFCs and HFCs consumption per GDP

Table 2. Comparison of emissions between the 1996 IPCC guidelines and the 2006 IPCC guidelines

IPCC Guidelines (GL) (Mill. tCO ₂ eq)		2018	2019	2020	2021	Percentage change from 2018 to 2021
‘96 IPCC GL	National total emissions	732.9	705.9	661.5	690.8	-5.7%
	ODS substitutes emissions (proportion)	8.8 (1.2%)	6.3 (0.9%)	5.9 (0.9%)	7.1 (1.0%)	-19.9%
‘06 IPCC GL	National total emissions	783.9	759.4	713.0	741.0	-5.5%
	ODS substitutes emissions (proportion)	23.1 (3.0%)	24.7 (3.3%)	27.2 (3.8%)	29.4 (4.0%)	27.2%

Source: GIR (2025a, 2025b)

향을 보였다. 2022년에는 A5-1의 평균 소비량을 하회하는 수준까지 감소했다. 몬트리올 의정서 이행에 따라 CFCs 및 HCFCs의 소비가 감소하면서, 이를 대체하기 위한 HFCs의 소비 및 배출이 증가한 사례는 유럽(Kim, 2022), 중국(Xiang et al., 2022), 그리고 동북아시아 지역¹⁾(Choi et al., 2024)에서 보고되어 왔다. 앞선 해외 사례를 통해 국내에서도 HCFCs 소비의 급격한 감소가 HFCs 소비 급증을 초래할 가능성을 시사한다. GDP 대비 HFCs 소비량 추세를 분석하기에는 자료의 시계열이 부족하지만, 국내 HFCs 소비량은 A5-1의 소비량보다 높은 수준을 유지하고 있다.

관리제도에 따르면, 2020년부터 2022년까지 국내 HFCs 소비량은 연평균 27,459톤으로 조사되었다. 해당 소비량은 HFCs 계열 중 많이 사용되는 물질인 R-410A의 GWP로 환산할 경우 약 57백만 톤 CO₂eq에 상응한다. 용도별로는 냉매가 전체 소비량의 71.3%(19,573톤)로 가장 높은 비중을 차지했으며, 그다음으로 발포제 18.4%(5,039톤), 소화약제 7.4%(2,031톤), 기타 3.0%(816톤) 순으로 나타났다.

국내 온실가스 통계는 교토의정서 체제하에서 96지침을 기반으로 작성되었으며, 활동자료와 배출계수가 확보된 일부 배출·흡수원에 대해서는 06지침을 부분적으로 적용해왔다. 이후, 2015년 채택된 파리협정에 따라 2024년 온실가스 통계 산정기준을 06지침으로 전면 개정하였다. 06지침은 96지침에 비해 온실가스 산정방법의 과학적·기술적 발전과 기초 자료 확보 여건의 향상을 반영하고 있다.

과거 ODS 부문의 배출량은 96지침에 따라 잠재 배출량 방식으로 산정되었다. 잠재 배출량이란 해당 연도에 생산되거나 수입된 ODS 대체물질의 양에서 폐기되거나 수출된 양을 제외한 나머지가 모두 배출된다고 가정하여 산출된 배출량을 의미한다. 반면, 개정된 06지침에서는 실제 배출량 산정 방식을 채택하였다. 실제 배출량은 HFCs 사용 제품의 수명 동안 누출되는 누적 배출량을 의미하며, 이로 인해 HFCs 소비 시점과 배출 시점 사이에 시차가 발생하게 된다(GIR, 2024b). 또한, 키갈리 개정서 이행을 위해 산정 대상을 2종에서 29종으로 확대되었다.

Table 2는 96지침과 06지침을 각각 적용한 ODS 부문 배출량을 비교한 것이다. 96지침 대비 06지침 배출량이 3~4배가량 증가하였으며, 국가 총배출량 대비 비중도 기존 1%대에서 4%로 증가하였다. 또한, 2018년 대비 2021년의 배출량 증가율은 96지침 기준으로 19.9% 감소했으

나, 06지침 기준으로는 27.2% 증가하여, 이는 NDC 목표 달성에 있어 불리한 요인으로 작용할 가능성을 시사한다.

3. 분석방법

3.1. 시나리오

본 연구에서는 정책 옵션별 HFCs 배출량에 미치는 감축 효과를 살펴보기 위해 다섯 가지 시나리오를 구성하였다(Table 3).

Table 3. Summary of scenarios

Scenario	Abb.	HFCs mitigation measures
Montreal	M	Phase-down schedule adopted under the Montreal protocol
Kigali	K	Phase-down schedule adopted under the Kigali amendment
Transition	T	Transition to low GWP substances
Retirement	R	Transition to low GWP substances + Early retirement of existing equipment
Enhanced	E	Transition to low GWP substances + Enhanced early retirement of existing equipment

몬트리올(M) 시나리오는 몬트리올(M) 의정서에서 규정한 HCFCs 감축 일정을 준수하며, HCFCs 소비가 HFCs 소비로 전환되는 상황을 가정한다. 이 시나리오는 기준 시나리오를 나타내며, HFCs의 저GWP 물질로의 전환을 고려하지 않은 시나리오이다.

키갈리(K) 시나리오는 키갈리 개정서의 HFCs 감축 일정을 준수하는 상황을 가정한다. 해당 시나리오는 HFCs 공급만 강제하는 시나리오로, 몬트리올(M) 시나리오의 HFCs 수요를 충족하기 위한 물질 전환이나 추가 감축 정책 수단을 고려하지 않는다.

전환(T) 시나리오는 몬트리올(M) 시나리오에 고GWP HFCs의 물질 전환을 반영하여 분석한다. 관리제도에서는 용도별(냉매, 소화약제) 및 제품군별(가정용 냉장고, 쇼케이스, 승용차, 소화기 등) 대체 물질의 기술 개발 수준에 따라 GWP 제한과 적용 시기를 차등화하고 있다. 그러나 본 연구에서 활용한 HFCs 소비량 자료는 제품군이 구분되어 있지 않으므로, 관리제도의 용도별 최대 적용 시기

1) 중국, 일본, 한국, 북한, 대만.

와 GWP 제한 수준을 참고하여 전체 HFCs를 대상으로 2025년부터 제한 시점까지 점진적으로 고GWP 물질 소비 금지를 적용한다.

퇴출(R) 시나리오는 관리제도에서 다루지 않았던 ‘고 GWP 냉매 사용 제품의 조기 퇴출’을 추가적인 감축 수단으로 적용한다. 이 감축 수단은 ‘노후 경유차의 조기 퇴출’과 유사한 접근법으로, 고 GWP 냉매 사용 제품을 조기에 퇴출시켜 저 GWP 냉매 사용 제품의 신속한 도입을 유도한다. 고 GWP 냉매 사용 제품의 조기 퇴출은 제품의 수명을 단축하는 방식으로 분석되며, 관리제도의 물질 전환 정책과 함께 종합적인 효과를 분석한다.

마지막 강화(E) 시나리오는 퇴출(R) 시나리오의 고 GWP 냉매 제품의 수명 단축 수준을 다르게 설정하여 수명 단축에 따른 민감도를 분석하고자 한다.

시나리오별 정책 및 수단에 대한 주요 가정은 Table 4에 제시되어 있다. 관리제도의 고GWP 물질 전환은 신규 제품 제작 시 적용되는 감축 수단이다. 즉, 신규용 HFCs 소비의 감축 효과는 기대할 수 있으나, 기존 제품의 유지보수용에 대한 소비는 감축 조치 대상에서 제외된다²⁾. 또한, 앞서 언급했듯이 HFCs 소비량 데이터가 제품군별 구분이 되지 않아 용도별 최대 적용 시기와 GWP 제한 수준을 모든 HFCs에 동일하게 가정하였다. 감소되는 HFCs는 신규 물질(자연 냉매, HFO 등)로의 전환을 가정하고, 전환되는 신규물질의 GWP는 0으로 가정한다.

3.2. 자료 및 방법론

3.2.1. 자료 구축

본 연구에서 활용한 HFCs 소비량은 UNEP³⁾ 및 인벤토리 통계⁴⁾로 용도는 냉매, 발포제, 소화약제, 에어로졸, 용매로 구분된다. 용도별 세부 제품군별 자료는 구분되어 있지 않으며, 용도별 수명 및 배출계수는 IPCC에서 기본으로 제공한 값을 참고하였다.

3.2.2. HFCs 소비량 전망

용도별 2013년부터 2021년의 소비량 자료를 활용하여, 2022년에서 키갈리 감축일정의 마지막 연도인 2045년까지 전망하였다. 각 시나리오의 소비량 전망 방법은 다음과 같다.

① 몬트리올(M) 시나리오

몬트리올(M) 시나리오에서의 HFCs 소비량(C_i^{base})은 몬트리올(M) 의정서 감축일정에 따라 감소되는 HCFCs 소비량($HCFC_i$)이 HFCs 소비로 전환되는 것을 가정하여 식 (1)과 같이 산정한다.

Table 4. Main assumptions for each scenario

Uses of HFCs	Scenario	Transition to low GWP substances		Lifetime (year)	Leakage rate ¹⁾ (per year)
		Date of application	GWP threshold		
Refrigerant	M	-	-	15 ¹⁾	15%
	K	-	-		
	T	2032	750		
	R			13	
	E			10	
Fire protection	M	-	-	20 ¹⁾	2%
	K	-	-		
	T	2030	150		
	R				
	E				

1) Source: IPCC (2008)

2) 전문가 의견에 따르면, 냉매의 경우 최근 HFCs 소비량의 약 65%가 유지보수용으로 사용.

3) 국가별 HCFCs 및 HFCs 소비량과 기준년도 제공.

4) 각국의 온실가스 인벤토리는 UNFCCC 홈페이지에 업로드되며, 국가별 연도별 배출원별 배출량 및 활동자료 파악 가능.

$$C_t^{bau} = \begin{cases} HFC_{t-1} + \frac{(HCFC_t - HCFC_{t-1})}{HCFC_{t-1} - HCFC_{2013}} \times \frac{HFC_{t-1} - HFC_{2013}}{HCFC_{t-1} - HCFC_{2013}}, & t \leq 2030 \\ HFC_{t-1} \times \frac{GDP_t}{GDP_{t-1}}, & t > 2030 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 HCFCs 소비량은 몬트리올 기준(한도⁵⁾를 의미한다. HCFCs는 2013년부터 감축이 시작되어, 2015년에는 10%, 2020년에는 35%, 2025년에는 67.5%로 점진적으로 감소하며, 2030년에는 전폐 될 계획이다. HCFCs 기준한도는 UNEP (2024)에서 발표한 HCFCs 소비 실적에 몬트리올 의정서의 감축률을 적용하여 산출되며, 5개년 간격의 기준한도는 선형 보간법을 통해 계산된다(Table 5).

Table 5. HCFCs Quota under the Montreal protocol in South Korea

Year	2013	2015	2020	2025	2030
Reduction rate compared to 2013	-	10.0%	35.0%	67.5%	100%
HCFCs Quota (KtCO ₂ eq)	38,649 ¹⁾	41,634 ¹⁾	30,281 ¹⁾	12,559	0

1) These actual statistical figures are sourced from UNEP (2024)

HCFCs가 전폐되는 2030년까지는 HCFCs에서 HFCs로의 소비 전환율을 적용하고, 2030년 이후에는 GIR (2024c)에서 전망한 중위 시나리오의 GDP (Table 6) 성장률 ($\frac{GDP_t}{GDP_{t-1}}$)을 적용한다. 이같이 전망한 HFCs의 총 소비량은 2021년 용도별, 물질별(*i*) 비중으로 고정하여 세분화한다. 즉, 몬트리올(M) 시나리오에서는 용도 및 물질 믹스의 변화가 없는 것으로 가정한다.

Table 6. GDP projection under the median scenario

(Unit: Trillion KRW)								
Year	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
GDP	2,537	2,574	2,609	2,644	2,678	2,709	2,739	2,767
Year	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
GDP	2,794	2,819	2,841	2,861	2,879	2,896	2,912	2,926

Source: GIR (2024c)

5) 기준한도란 몬트리올 의정서 및 키갈리 개정서의 감축 일정에 따라 제한된 수량을 의미.

② 키갈리(K) 시나리오

MOTIE (2023)의 「특정물질(HFC류)의 생산량 및 소비량 기준(한도) 등 공고」의 기준(한도)은 키갈리 개정서의 기준수량(Table 1 참고)에 의해 HCFCs와 HFCs의 수량이 모두 고려된 기준(한도)이다. 본 연구에서는 HFCs가 전망 대상이므로 HFCs만 고려된 기준(한도)을 재설정한다. Table 7의 기준(한도)(A)는 산업통상자원부에 공고된 기준(한도), HCFCs 기준(한도)(B)는 Table 5의 HCFCs 기준(한도)을 나타낸다. 여기서 HFCs의 기준(한도)은 공고된 기준(한도)(A)에 HCFCs 기준(한도)(B)를 제외한 값으로 가정한다.

키갈리(K) 시나리오의 HFCs 총소비량은 Table 7의 HFCs 기준(한도)로 고정하고, 세부 물질(*i*)의 믹스는 최적화 방법론을 활용해 도출한다. HFCs 기준(한도)(\bar{C}_i)를 만족하면서 GWP 환산 전 실 수량($c_{i,t}$)을 최대화할 수 있는 최적 믹스를 도출하되, 전년도 소비량($c_{i,t-1}$)은 키갈리의 최대 감축률인 80% ($\alpha=0.8$) 이내로 증감할 수 있도록 제한한다. 유지보수용과 신규용이 구분되는 냉매 용도의 HFCs 소비량은 유지보수용 수량을 제외하고 신규용 수량 ($(1 - \eta_t^{bau}) \bar{C}_i$)만 최적화한 후, 최적화된 신규 수량에 유지보수용 수량을 더해 최종 소비량($c_{i,t}$)을 도출한다(식 (2)).

$$obj. \quad MAX \left[\sum_i c_{i,t} \right] \quad (2)$$

$$const. \quad \sum_i (GWP_i \times c_{i,t}) = (1 - \eta_t^{bau}) \bar{C}_i$$

$$(1 - \alpha) \times c_{i,t-1} \leq c_{i,t}$$

유지보수용 비중(η_t)은 몬트리올(M) 시나리오에서 전망된 용도별, 물질별 소비량($c_{i,t}^{bau}$)으로부터 유지보수용 수량($C_{maint,t}$)을 계상한 후, 총 소비량(C_t^{bau})을 기준으로 비

Table 7. HFCs Quota under the Kigali amendment in South Korea

(Unit: KtCO ₂ eq)					
Year	2024	2029	2035	2040	2045
Total Quota ¹⁾ (A)	82,198	73,960	57,532	41,090	16,429
Reduction rate compared to baseline	-	10%	30%	50%	80%
HCFCs Quota (B)	14,423	1,539	-	-	-
HFCs Quota (A-B)	67,776	72,421	57,532	41,090	16,429

1) Source: MOTIE (2023)

증을 도출한다(식 (3)). 유지보수용 수량 관련 내용은 ④ 퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오에서 설명한다.

$$\eta_t = C_{maint,t} / C_t^{bau} \quad (3)$$

③ 전환(T) 시나리오

고GWP 물질 전환에 따른 HFCs 소비량($c_{i,t}^{sc}$)은 몬트리올(M) 시나리오에서 전망된 소비량($c_{i,t}^{bau}$)을 기준으로 계산된다. GWP 제한이 적용되는 시점($t_{restric}$)부터는 식 (4)를 기반으로 소비량이 결정된다. 이때, i 물질의 GWP (GWP_i)가 제한 GWP (\overline{GWP}) 이상일 경우, 신규 사용은 금지되며 유지보수용 수요($\eta_i^{sc} \times c_{i,t}^{bau}$)에 한해서만 소비가 가능하다. 단, HFCs 용도가 냉매 외로 사용되는 경우, 보충용 수요는 0으로 간주한다. 반면, 제한 GWP 미만의 물질의 소비 총량은 몬트리올(M) 시나리오에서 전망된 소비량이 전량 사용된다고 가정한다. 제한 GWP 및 적용 시점과 관련된 구체적인 내용은 Table 4에 제시되어 있다.

$$c_{i,t}^{sc} = \begin{cases} c_{i,t}^{bau} & , GWP_i < \overline{GWP} \\ \eta_i^{sc} \times c_{i,t}^{bau} & , GWP_i \geq \overline{GWP} \end{cases} \quad \text{if } t \geq t_{restric} \quad (4)$$

고GWP 제한 적용 시기 이전일 경우, 소비량은 식 (5)에 따라 산정된다. 식 (5)는 고 GWP 물질 제한 적용 시점을 기준으로 소비량이 이산적으로 감소하는 것이 아니라, 적용시점 이전부터 서서히 감축이 이루어진다는 가정하에 가중 보간법(Weighted interpolation)을 적용한 것이다. 2025년부터 점진적으로 감소하다 제한 시점의 2~3년 전부터는 급속히 감소하는 패턴으로 설정하기 위해 가중치(p)를 6으로 설정했다. 단, 식 (5)에 의한 소비량은 몬트리올(M) 시나리오의 소비량 이하로 제약한다.

$$c_{i,t}^{sc} = c_{i,2024}^{sc} + (c_{i,t_{restric}}^{sc} - c_{i,2024}^{sc}) \left(\frac{t - 2024}{t_{restric} - 2024} \right)^p ,$$

if $2025 \leq t < t_{restric}$

(5)

④ 퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오

퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오의 소비량 전망 방법은 전환(T) 시나리오 식 (4) 및 식 (5)와 동일하다. 그러나, 고 GWP 냉매를 사용하는 기존 제품의 수명 가정에 따라 달라지는 유지보수용 비중(η_i^{sc})을 적용한다. 식 (3)의 유지보수용 비중(η_t)에서 유지보수용 수량($C_{maint,t}$)은 t 기로부터 수명(*lifetime*) 종료 시점까지의 누적 소비량에 누출률(γ)을 곱하여 누출량을 산출하고, 해당 누출량이 전량 유지보수용 수요가 된다는 가정하에 식 (6)과 같이 도출한다. 각 시나리오별 제품 수명과 누출률은 Table 4에 제시되어 있다.

$$C_{maint,t} = \gamma \times \sum_i \left[\sum_t^{j=lifetime} c_{i,t-j}^{bau} \right] \quad (6)$$

단, 유지보수용 수요에 대한 과거 정보가 부재하므로, 2020~2022년 평균 유지보수용 소비 비중인 65%를 전망 시작 연도인 2013년부터 2022년까지 동일하게 적용하였다. 이후 2023년부터는 식 (3)과 식 (6)을 이용하여 유지보수용 비중을 산출한다.

3.2.3. HFCs 배출량 산정

06 지침에 제시된 HFCs 배출량 산정방법론은 4가지이다. Tier 1a는 용도 수준에서 배출계수 접근법으로 설비나 제품 형태(하위용도) 수준보다는 용도 수준에서의 기본적인 활동도 자료와 사용 가능성에 의해 좌우된다. Tier 1b

는 적용 수준에서의 물질수지 접근법으로 생산과 소비, 폐기에서의 배출량을 산정하지만, 배출계수에 의존하지는 않는다. 대신 해당 국가에서 특정 화학물질이나 고찰되고 있는 설비의 산정된 소비(즉, 판매량)를 사용한다. Tier 2a는 배출계수 접근법으로 ODS 대체물질의 최종 배출이 일어나는 각각의 하위용도에 해당하는 여러 제품과 최종 사용으로부터 도출된다. Tier 2b는 물질수지 접근법으로 하위용도 수준에 적용된다는 것만 제외하면, Tier 1b에서 기술된 접근법과 유사하다(IPCC, 2008).

한국은 현재 Tier 1a 방법론을 활용하여 HFCs 배출량을 산정하고 있으며, 냉장 및 냉방 부문의 배출량 산정 식(IPCC, 2008)은 아래와 같다. 순소비량(c_t)에 당해연도 배출계수(ef_t)를 곱한 값과 과거부터 총 축적된 물질량(bc_t)에 축적된 양의 배출계수(ef_t')를 곱한 값으로 배출량(E_t)을 산정한다.

$$E_t = c_t \times ef_t + bc_t \times ef_t' \quad (7)$$

본 연구에서는 시나리오별, 용도별 전망된 HFCs 소비량을 06 지침의 Tier 1a 방법론을 준용하여 온실가스 배출량으로 산정한다. 이때, HCFCs는 온실가스로 분류되지 않아 배출량 산정에서 제외한다.

4. 결과

Table 9는 몬트리올(M) 시나리오의 HFCs 기준 소비량 전망 결과를 제시하고 있다. HCFCs가 전면적으로 폐기되는 2030년 이전까지 HCFCs 소비 감소량의 약 두 배가 HFCs 소비량으로 전환되는 것으로 나타났다. 이에 따라 HFCs 소비량은 연평균 5.5% 증가하였고, HCFCs 전폐 이후에는 증가 속도가 둔화되어 연평균 0.9%의 성장률을 보일 것으로 분석되었다.

전망된 몬트리올(M) 시나리오의 소비량은 키갈리(K) 시나리오 대비 2035년 약 2배, 2045년 약 8배 수준에 도달할 것으로 나타났으며, 시간이 지남에 따라 그 격차가 점차 확대될 것으로 보인다. 이러한 결과는 키갈리 감축 목표를 달성하기 위해서는 대폭적인 소비감축 노력이 필요함을 시사한다.

Fig. 2는 전환(T) 시나리오의 소비량 전망을 나타낸다. 고GWP 물질 전환 정책을 반영한 전환(T) 시나리오에서의 소비량은 몬트리올(M) 소비량에 비해 감소하였으나, 정책 도입이 시작된 2032년을 제외하면 여전히 키갈리 기준 한도를 초과하는 것으로 나타났다.

몬트리올(M) 시나리오와 비교했을 때, 전환(T) 시나리오의 소비 감축 잠재량은 2025년 0.9백만 톤에서 2045년 58.1백만 톤까지 증가하였다. 2025년부터 고GWP 물질 사용이 제한되기 시작한 2032년까지 HFCs 소비량은 연평균 3.8% 감소했으며, 이후 감소 속도가 느려져 연평균

Table 8. Comparison of tier-based approaches for HFC emissions

	Emission-Factor Approach (a)	Mass-Balance Approach (b)
Tier 1	<ul style="list-style-type: none"> • Data on chemical sales by application • Emission factors by application 	<ul style="list-style-type: none"> • Data on chemical sales by application • Data on historic and current equipment sales adjusted for import/export by application
Tier 2	<ul style="list-style-type: none"> • Data on chemical sales and usage pattern by sub-application • Emission factors by sub-application 	<ul style="list-style-type: none"> • Data on chemical sales by sub-application • Data on historic and current equipment sales adjusted for import/export by sub-application

Source: IPCC (2008)

Table 9. Comparison of projected HFCs consumption between Montreal and Kigali scenarios in South Korea

Scenario	HFCs Consumption (Mill. CO ₂ e _q)					Average annual growth rate	
	2025	2030	2035	2040	2045	'22-'30	'31-'45
Montreal	84.7	109.8	117.2	123.0	126.6	5.5%	0.9%
Kigali	67.9	70.9	57.5	41.1	16.4	-0.1%	-9.7%

6) 순소비량은 생산량과 수입량에서 수출량과 폐기량을 제외한 소비량을 의미하며, 당해연도 배출계수와 축적된 양의 배출계수는 모두 06 지침의 기본값 15%를 적용.

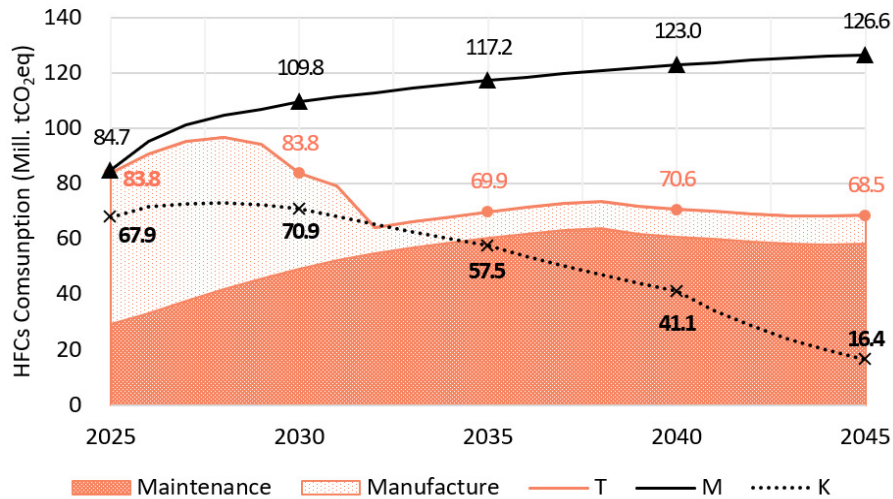


Fig. 2. Projected HFCs consumption for maintenance and manufacture in transition scenario

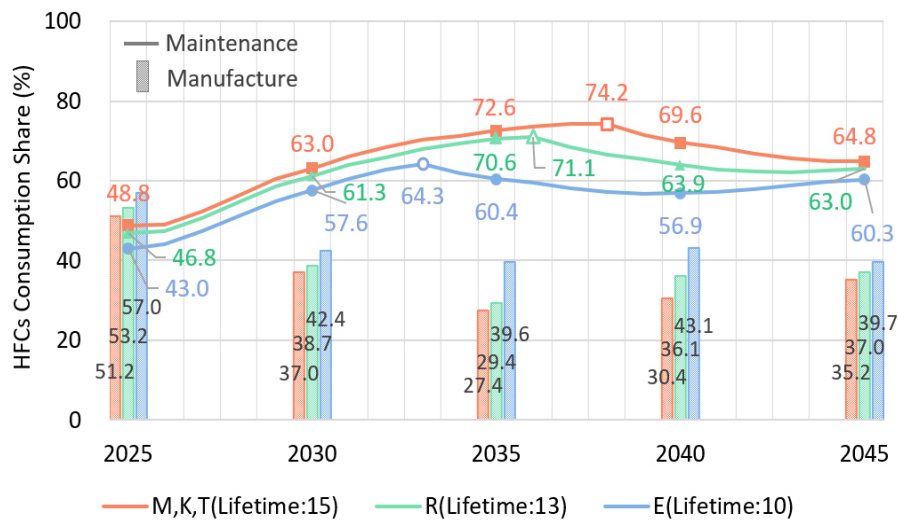


Fig. 3. HFCs consumption share for maintenance and manufacture by scenarios

0.3% 수준에 머물렀다. 한편, 물질 전환 정책으로 인해 소비 감소세가 지속될 것으로 예상되었으나, 2032년에서 2037년 사이에 소폭 증가한 것으로 나타났다. 이는 두 가지 요인에 기인한 것으로 볼 수 있다. 첫째, 초기 도입된 신규 소비가 유지보수 수요로 전환된 점과 둘째, 고GWP 전환 정책은 신규 제품을 대상으로 하기에 증가하는 유지보수 수요를 줄이기 어렵다는 점이다.

Fig. 3에서는 유지보수용 비중을 선 그래프로, 신규용 비중은 막대그래프로 나타내고 있다. 유지보수용 소비 비중은 2037년까지 증가하였으며(약 74%), 이후 점진적으로 감소하는 추세를 보였다.

퇴출(R)과 강화(E) 시나리오에서는 냉매 사용 제품의 수명을 기준 수명(15년)보다 각각 13%(13년), 20%(10년)으로 단축하여 유지보수 수요를 분석하였다. 전환(T) 시나리오에서 유지보수용 소비는 2037년까지 증가하는 것으로 나타났으나, 퇴출(R) 시나리오에서는 2036년, 강화(E) 시나리오에서는 2033년으로 정점 시점이 앞당겨졌다. 시기뿐만 아니라 유지보수용 소비 비중도 감소하여, 전환(T) 시나리오에서 최대 74.2%로 전망되지만, 퇴출(R) 시나리오에서는 71.1%, 강화(E) 시나리오에서는 64.3%로 감소했다.

반면, 기존 제품의 조기 퇴출로 인해 신규 제품의 도입

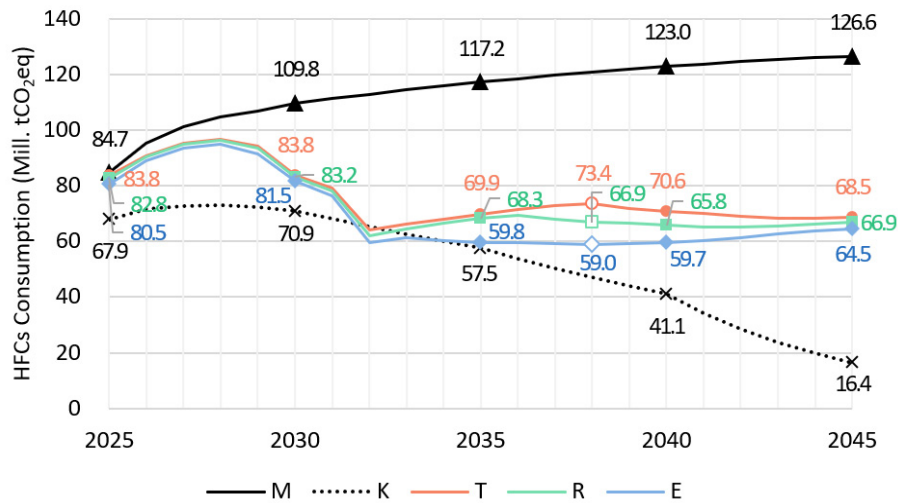


Fig. 4. Comparison of projected HFCs consumption among scenarios

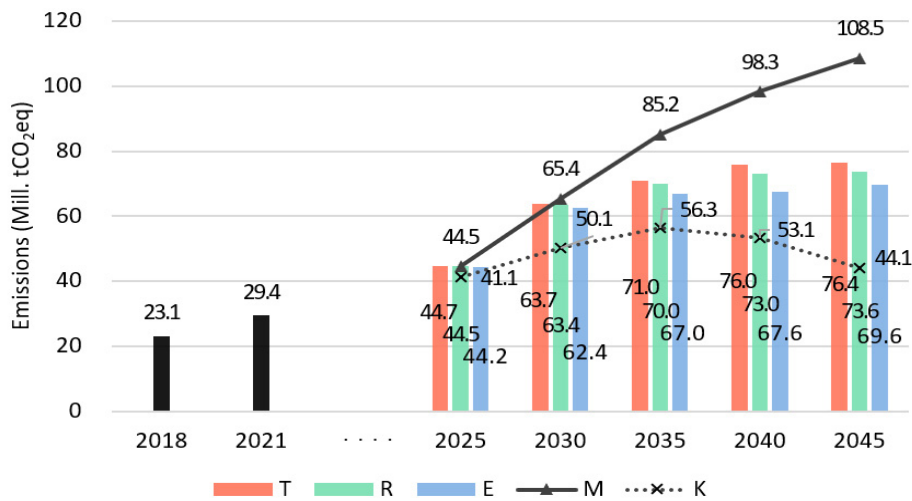


Fig. 5. Projected emissions of product uses as ODS substitutes

이 증가하여, 2040년 기준으로 전환(T) 시나리오의 신규 용 소비 비중은 30.4%, 퇴출(R) 시나리오는 36.1%, 강화(E) 시나리오는 43.1%로 분석되었다. 이러한 결과는 기존 제품의 조기 퇴출은 신규 제품에만 적용되는 고GWP 물질 전환 정책을 보완하여 감축 효과를 상승시킬 수 있는 감축 수단임을 시사한다. 그러나 2040년쯤에는 기존 제품의 퇴출이 완료되어 2045년에 조기 수명 단축에 의한 유지보수용 소비 감소 효과가 시나리오별 비슷한 수준으로 나타났다.

Fig. 4는 시나리오별 HFCs 소비량 전망 결과를 나타낸

다. 예상한 바와 같이 감축 수단 적용 대상의 확대와 유지보수용 소비의 감소로 인해 퇴출(R)과 강화(E) 시나리오에서 전환(T) 시나리오보다 소비량 감축률이 더 높은 것으로 나타났다. 몬트리올(M) 시나리오와 비교한 시나리오별 소비감축률은 2037년 기준으로 전환(T) 39.3%(감축량 47.0백만톤), 퇴출(R) 43.4%(51.9백만톤), 강화(E) 50.5%(60.5백만톤)로 전망되었다. 2045년에는 각각 전환(T) 45.9%(58.1백만톤), 퇴출(R) 47.1%(59.7백만톤), 강화(E) 49.0%(62.1백만톤)로 시나리오별 감축률 차이가 점차 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 앞서 전망된 HFCs 소비량을 기반으로 배출량을 산정한 결과를 보여준다. ODS 부문에서는 냉매의 경우 약 15년, 소화약제와 발포제의 경우 약 20년에 걸쳐 배출이 이루어지는 특성을 보인다. 이에 따라 감축 수단을 적용하더라도 과거 소비로 인한 배출이 멈추기까지 시간이 소요되며, 감축 효과가 완전히 나타나기까지는 상당한 기간이 필요하다. 다시 말해, ODS 부문의 감축 정책은 그 효과를 단기적으로 기대하기 어려우며, 정책 설계 시 장기적인 시각에서 접근해야 할 것이다.

키갈리(K) 시나리오를 기준으로 분석한 결과, 2024년 이후 소비 감축이 시작되더라도 과거 소비의 영향으로 인해 배출량은 2036년까지 지속적으로 증가한 후 감소세로 전환하였다. 해당 시나리오에 따르면, 2036년 예상 배출량은 57.6백만 톤으로, 이는 2018년의 ODS부문 배출량 대비 2.5배에 해당한다. 이러한 결과는 ODS 부문이 국가 온실가스 감축 목표에 실질적으로 기여하기 위해서는 키갈리 감축 일정보다 선제적이고 적극적인 소비 감축이 필요함을 시사한다.

한편, 키갈리(K) 시나리오 대비 감축 수단 도입이 지연된 전환, 퇴출(R), 강화(E) 시나리오에서는 배출량이 2045년까지 지속적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 2032년 이후 고 GWP 물질 전환 정책이 본격적으로 시행됨에 따라 배출량 증가 속도는 둔화되었다. 2025년부터 2032년까지 연평균 배출량 증가율은 전환(T) 시나리오에서 6.8%, 강화(E) 시나리오에서 6.5%로 나타났으나, 2032년 이후에는 증가율이 최소 0.1%에서 최대 0.6%로 현저히 감소하는 경향을 보였다. 또한, 2032년 이후 키갈리(K) 시나리오의 배출량은 연평균 2.2% 감소가 예상되는 반면, 퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오에서는 신규 용도뿐만 아니라 유지보수 용도까지 감축 대상으로 포함했음에도 불구하고 키갈리(K) 시나리오 수준의 배출량 감소 속도를 달성하기에는 한계가 있는 것으로 나타났다.

전환(T), 퇴출(R), 강화(E) 시나리오의 배출량은 키갈리(K) 시나리오 대비 높은 수준을 유지했으나, 몬트리올(M) 시나리오와 비교할 때 2035년 기준으로 각각 16.7%(감축량 14.3백만 톤), 17.9%(감축량 15.3백만 톤), 21.4%(감축량 18.2백만 톤) 감소한 것으로 분석되었다. 이는 키갈리(K) 시나리오보다 감축 속도가 느리지만, 몬트리올(M) 시나리오보다는 배출 감소 효과가 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 HFCs 소비로 인한 직접 배출량만을 고려하여 분석을 수행하였다. 그러나 직접 배출 외에도, HFCs를 사용하는 제품(냉동고, 에어컨 등)의 운전 과정에

서의 전력 소비를 통해 간접적인 온실가스 배출을 유발한다(Velders et al., 2022). Purohit et al. (2020)은 HFCs 소비 감축만으로는 온실가스 저감 효과가 제한적이며, 냉방 기기의 에너지 효율 개선이 수반되지 않는 경우 전력 소비 절감 효과가 나타나지 않는다고 분석하였다. 이러한 선행연구 결과는, 퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오에서 고려한 기존 제품의 조기 퇴출이 저효율의 노후 장비를 고효율 신제품으로 대체함으로써 에너지 효율 향상에 따른 전력 소비 절감과 이에 따른 간접 배출량 감소 효과를 기대할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 시사점

본 연구는 국내 정책 시나리오의 분석을 통해 HFCs 소비 및 온실가스 배출에 미치는 영향을 살펴보았다. 몬트리올(M) 시나리오에 몬트리올 의정서의 감축 일정에 의해 감소한 HCFCs가 HFCs로의 소비 전환을 가정한 경우로, HFCs에 대한 감축 수단이 적용되지 않은 시나리오이다. 키갈리(K) 시나리오에 키갈리 개정서의 감축 일정을 준수하며, 전환(T)은 고 GWP 물질 전환을 적용하고, 퇴출(R)과 강화(E) 시나리오는 냉매 사용 제품의 조기 퇴출을 포함하여 추가적인 감축 정책을 반영하였다.

분석 결과, 몬트리올(M) 시나리오에서는 과거 소비에 의한 배출이 누적되어 배출량이 지속해서 증가하는 것으로 나타났다. 키갈리(K) 시나리오는 2036년에 배출량이 정점을 찍은 후 감소세로 전환되었으나, 2018년 배출량 대비 2.5배 증가하는 것으로 분석되었다. 전환(T), 퇴출(R) 및 강화(E) 시나리오에서는 몬트리올(M) 시나리오 대비 소비량과 배출량의 감축 효과가 나타났으나, 유지보수 용 냉매 소비가 여전히 감축 효과를 제한하는 요소로 작용하였다. 특히, 모든 시나리오에서 키갈리 기준 한도를 초과하였으며, 시간이 지남에 따라 그 격차가 확대되는 양상을 보였다.

이러한 분석 결과는 ODS 부문 온실가스 감축 정책의 설계와 실행에 있어 다음과 같은 중요한 시사점을 제공한다. 첫째, 현재 고 GWP 물질 전환 시기(2032년) 이후 더욱 강화된 물질 제한을 도입하여 키갈리 기준한도와 격차를 좁히는 노력이 필요하다. 예를 들어, EU의 F-gas 관리법에서는 산업용 냉장기 냉매에 대해 2020년에 GWP 2,500 이상의 사용을 금지하였고, 2030년에는 GWP 150 이상의 사용을 금지하는 방향으로 단계적인 계획이 수립되었다.

둘째, 유지보수용 냉매 소비는 감축 효과를 제약하는 주요 요인으로 나타났다. 이를 보완하기 위해 현 관리제도에서 강조하고 있는 누출 관리 강화를 넘어, 기존 고 GWP 냉매 제품의 조기 퇴출을 점진적으로 추진하여 고 GWP 물질 수요를 줄이고, 신규물질 도입을 촉진하는 방안을 고려할 필요가 있다. 아울러, 기존 제품의 조기 퇴출은 고효율 신제품의 도입을 유도할 수 있으며, 이를 통해 에너지 효율 향상 및 전력 소비 절감 효과를 기대할 수 있고, 결과적으로 간접 온실가스 배출량의 감소 또한 가능할 것으로 유추할 수 있다.

마지막으로 ODS 부문의 누적 배출 특성을 고려할 때 감축 조치의 효과는 단기간에 나타나기 어려우며, 그 효과를 오롯이 나타내기에는 최소 15~20년의 기간이 소요된다. HFCs 소비 증가가 예상되는 가운데 초기 단계에서 적극적인 감축 노력을 통해 소비 증가를 억제하고, 향후 누적 배출량을 신속히 감소시키는 것이 온실가스 감축에 효과적일 것이다.

본 연구는 국내에서 최초로 시행되는 HFCs 관리제도의 일부인 고 GWP 물질 사용 제한이 온실가스 감축에 미치는 효과를 분석하였다. 다만, 자료 해상도의 한계로 인해 제품군별 감축 효과를 세부적으로 분석하지는 못하였다. 그럼에도 불구하고, HFCs 소비량 전망을 위한 방법론을 구축하고 국내 물질 전환 정책에 대한 시사점을 제공했다는 점에서 의의를 지닌다. 본 연구의 결과는 향후 관리제도의 냉매 누출 관리, 재생 냉매 사용 확대 등 ODS 부문의 온실가스 감축 효과를 분석하는 데 유용한 기반이 될 것으로 기대된다.

Reference

- Choi H, Redington AL, Park H, Kim J, Thompson RL, Mühle J, Salameh PK, Harth CM, Weiss RF, Manning AJ, Park S. 2024. Revealing the significant acceleration of hydrofluorocarbon (HFC) emissions in eastern Asia through long-term atmospheric observations, *Atmos Chem Phys* 24: 7309-7330. doi: 10.5194/acp-24-7309-2024
- EPA. 2025. Enforcement of the American Innovation and Manufacturing Act of 2020 (Last updated on Feb 11, 2025); [accessed 2025 Feb 19]. <https://www.epa.gov/enforcement/enforcement-american-innovation-and-manufacturing-act-2020>
- EU. 2024. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024. p. 60.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2024a. 2023 National Greenhouse Gas Inventory (1990~2021) summary ('06 IPCC guidelines); [accessed 2025 Feb 11]. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=78&boardMasterId=2&boardCategoryId=>
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2024b. Climate change and carbon neutrality 27: 50-57.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2024c. Research on developing long-term GDP projections for greenhouse gas emissions forecasting.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2025a. National greenhouse gas inventory (1990~2002) ('06 guidelines); [accessed 2025 Feb 11]. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=79&boardMasterId=2&boardCategoryId=>
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2025b. National greenhouse gas inventory (1990~2002) ('96 guidelines). [accessed 2025 Feb 11]. <https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=36&boardId=79&boardMasterId=2&boardCategoryId=>
- IPCC. 2008. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Chapter 7. Emissions of fluorinated substitutes for ozone depleting substances. p. 7.45-7.47.
- Joint Ministries. 2024. Policy improvement measures for hydrofluorocarbon (HFC) management to reduce greenhouse gas emissions; [accessed 2024 Dec 20]. <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1715020>

- Kim D. 2022. Reinforcement of refrigerant gas regulations in EU and implications for carbon neutrality (in Korean with English abstract). *Environ Resource Econ Rev* 31(4): 777-799. doi: 10.15266/KEREA.2022.31.4.777
- Ministry of the Environment, Government of Japan. 2016. Act on rational use and proper management of fluorocarbons: Japan. Tokyo, Japan.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). 2022. Institutional improvement measures for reducing hydrofluorocarbon (HFC) used in refrigerants - Approval of the amendment to the Ozone Layer Protection Act for the domestic implementation of the Kigali Amendment at the Cabinet Meeting (Oct. 11); [accessed 2025 Feb 11]. <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=43&boardNo=1014&menuLevel=2&menuNo=73>.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). 2023. Announcement on production and consumption limits for specific substances (HFCs); [accessed 2025 Feb 11]. <https://www.law.go.kr/LSW//conAdmRulByLsPop.do?&lsiSeq=244977&joNo=0003&joBrNo=00&datClsCd=010102&dguBun=DEG&lnkText=%25EA%25B3%25B5%25EA%25B3%25A0%25ED%2595%2598%25EC%2597%25AC%25EC%2595%25BC%2520%25ED%2595%259C%25EB%258B%25A4&admRulPttinfSeq=8862>.
- Purohit P, Höglund-Isaksson L, Dulac J, Shah N, Wei M, Rafaj P, Schöpp W. 2020. Electricity savings and greenhouse gas emission reductions from global phase-down of hydrofluorocarbons. *Atmos Chem Phys* 20(19): 11305-11327. doi: 10.5194/acp-20-11305-2020
- UN Environment Programme. 2020. Handbook for the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. 14th ed.
- UNEP. 2016. The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC phase-down. Paris, France.
- UNEP. 2024. Avoided CO₂e by the Montreal Protocol; [accessed 2024 Oct 31]. <https://ozone.unep.org>.
- Velders GJM, Daniel JS, Montzka SA, Vimont I, Rigby M, Krummel PB, Muhle J, O'Doherty S, Prinn RG, Weiss RF, Young D. 2022. Projections of hydrofluorocarbon (HFC) emissions and the resulting global warming based on recent trends in observed abundances and current policies. *Atmos Chem Phys* 22: 6087-6101. doi: 10.5194/acp-22-6087-2022
- World Bank. 2024. GDP (constant 2015 US\$); [accessed 2024 Oct 31]. <https://data.worldbank.org>.
- Xiang XY, Zhao XC, Jiang PN, Wang J, Dao D, Bai FL, An MD, Yi LY, Wu J, Hu JX. 2022. Scenario analysis of hydrofluorocarbons emission reduction in China's mobile air-conditioning sector. *Adv Clim Change Res* 13: 578-586. doi: 10.1016/j.accre.2022.04.006

부록

Appendix 1. Projected emissions of product uses as ODS substitutes

(Unit: Million tCO₂eq)

Scenario	Use of HFCs	2018 ¹⁾	2021 ¹⁾	Projection				
				2025	2030	2035	2040	2045
Montreal (M)	Total	23.1	29.4	44.5	65.4	85.2	98.3	108.5
	Refrigerant	21.4	26.8	39.9	57.0	68.4	76.8	81.2
	Fire Protection	1.1	1.7	2.8	4.7	11.4	14.4	19.4
	Others	0.6	0.9	1.9	3.7	5.4	7.0	8.0
Kigali (K)	Total	23.1	29.4	41.1	50.1	56.3	53.1	44.1
	Refrigerant	21.4	26.8	36.8	43.1	42.5	37.2	25.4
	Fire Protection	1.1	1.7	2.8	4.6	10.8	12.8	16.1
	Others	0.6	0.9	1.5	2.3	3.0	3.1	2.6
Transition (T)	Total	23.1	29.4	44.7	63.7	71.0	76.0	76.4
	Refrigerant	21.4	26.8	39.9	55.9	56.8	59.2	57.0
	Fire Protection	1.1	1.7	2.8	3.9	8.6	9.7	11.3
	Others	0.6	0.9	2.0	3.9	5.6	7.0	8.1
Retirement (R)	Total	23.1	29.4	44.5	63.4	70.0	73.0	73.6
	Refrigerant	21.4	26.8	39.7	55.6	55.8	56.2	54.2
	Fire Protection	1.1	1.7	2.8	3.9	8.6	9.7	11.3
	Others	0.6	0.9	2.0	3.9	5.6	7.0	8.1
Enhanced (E)	Total	23.1	29.4	44.2	62.4	67.0	67.6	69.6
	Refrigerant	21.4	26.8	39.4	54.6	52.8	50.8	50.2
	Fire Protection	1.1	1.7	2.8	3.9	8.6	9.7	11.3
	Others	0.6	0.9	2.0	3.9	5.6	7.0	8.1

1) Source: GIR (2025a)