

폐김치냉장고에서의 HFC-134a 탈루배출 특성에 대한 연구

Fugitive Emission Characteristics of HFC-134a from Waste Kimchi Refrigerator

김 의 건 · 김 승 도^{1)*} · 이 영 표

한림대학교 기후변화연구센터, ¹⁾한림대학교 환경생명공학과

(2013년 6월 22일 접수, 2013년 7월 21일 수정, 2013년 11월 13일 채택)

Eui-Kun Kim, Seungdo Kim^{1)*} and Young phyo Lee

Research Center for Climate Change, Hallym University

¹⁾*Department of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University*

(Received 22 June 2013, revised 21 July 2013, accepted 13 November 2013)

Abstract

In 1995 Kimchi refrigerator was developed at first, and has used HFC-134a as refrigerant. Kimchi refrigerator has been made 1,044,694 on the basis of 2010, disposed about 160,000 per year. Although mobile air conditioning, commercial refrigerator, general refrigerator is regarded as a major source of HFC-134a, little information is available for its emission characteristics of HFC-134a. This paper addresses the fugitive emission factors of Kimchi refrigerator at use-phase and disposal-phase. The residual quantities of Korean-made fifty three waste Kimchi refrigerators were weighed using a commercial recover of refrigerants to determine the emission factors at the disposal-phase. On the other hand, the emission factors at use-phase were estimated from the residual quantities and operating times. The average residual rate of forty three scarp Kimchi refrigerators is determined to be $74.6 \pm 5.2\%$. The emission factor at the use-phase is estimated to be $3.5 \pm 0.8\%/yr$ as a result of using average age of 11.7 years and the average residual rate determined here. The emission factor at the disposal-phase is determined to be 31.3% after adopting 58% of the recycling rate of refrigerant reported by Recycling Center. We estimate 3.1 g/yr for the average emission quantity of HFC-134a per operating refrigerator, while 22.5 g for that per waste Kimchi refrigerator. Since the chemical compositions of refrigerant of waste Kimchi refrigerator were the same as those of new refrigerator, it is expected that the HFC-134a recovered from waste Kimchi refrigerator can be reused for refrigerant.

Key words : Kimchi refrigerator, Greenhouse gas, HFC-134a, Refrigerant, Fugitive emission factor, Chemical composition, Recycling

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)33-248-2153, Email : sdkim@hallym.ac.kr

1. 서 론

우리나라의 고유 음식문화인 김치를 저장하기 위해 1995년 처음으로 김치냉장고가 개발되었으며, 김치냉장고의 냉매로는 HFC-134a (Hydrofluorocarbon; R-134a)가 주로 사용되고 있다. HFC-134a는 오존층을 파괴하는 염소 대신 수소가 결합되어 있어 오존파괴지수 (Ozone Depletion Potential; ODP)가 0이지만 지구온난화지수 (Global Warming Potential; GWP)가 1,300으로 상당히 높아 기후변화협약과 교토의정서에 의해 온실가스로 규정되고 있다 (Stemmler *et al.*, 2004). 따라서 국내에서는 2004년부터 R-600a (R은 Refrigerant를 의미)를 냉매로 사용하는 제품을 출시하고 있다.

김치냉장고는 우리나라에서만 사용하고 있기 때문에 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006)에서 보고된 일반냉장고 탈루배출계수 (사용단계 탈루배출계수: 0.1~0.5%/yr, 폐기단계 잔류율: 0~80%) 적용에 한계가 있다. 또한 국내 일반냉장고의 탈루배출에 대한 연구는 진행되었으나 (Kim *et al.*, 2013), 일반냉장고는 상용의 편리성을, 김치냉장고는 보관성에 치중을 두고 개발되었기 때문에 구조도 다르며 유지되는 온도가 다르다. 따라서 일반냉장고와 김치냉장고를 분류하여 탈루배출계수를 개발해야 한다.

가정에서 사용하고 있는 김치냉장고는 2010년 기준으로 1,044,694 (Korea Refrigeration And Air-Conditioning Industry Association, 2011)대가 생산되고 있고, 폐기 통계는 없는 상황이나, 연간 16만대 정도 배출되리라 추정하고 있다 (Korea Environment Institute, 2009). 국내에서는 리사이클링 센터를 설치 운영하여 폐김치냉장고를 회수 재활용하고 있으며, 이 과정에서 냉매도 회수 재활용하고 있다. 그러나 앞에서 언급한 것처럼 일반냉장고의 HFC-134a 배출량에 대한 연구는 진행되었으나 김치냉장고로부터의 배출량에 대한 체계적인 연구가 없었고, 폐김치냉장고로부터 회수되는 HFC-134a의 성분이 재사용 가능할 정도로 순도를 유지하고 있는지 등에 대한 조사 분석이 없는 상황이다. 그러므로 김치냉장고에서 배출되는 HFC-134a를 효과적으로 관리하기 위해서는 배출특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구는 김치냉장고로부터 HFC-134a의 배출특

성을 파악하여 김치냉장고로부터의 HFC-134a 배출을 효과적으로 관리하기 위한 기초 정보를 제공하는데 그 목적을 두고 있다. 폐김치냉장고에 잔류하는 HFC-134a의 양을 토대로 사용단계에서의 배출계수를 추정하였고, 폐김치냉장고의 잔류량에서 재활용되는 양을 제외하여 폐기단계에서의 배출계수도 결정하였다. 또한 폐냉매의 성분 분석을 통해 폐냉매 재활용 여부도 파악하였다. 본 연구 결과는 김치냉장고에서의 HFC-134a의 국가 고유배출계수 결정에 기여하며, 폐냉매 재활용 기준 마련에 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 사용단계

김치냉장고에서의 냉매 배출모델을 개발하기 위해서 적용한 가정은 일반냉장고에서 개발한 모델과 동일하게 적용하였다. 적용된 가정은 1) 냉매장치에서의 탈루는 배관과 접속 부분에서 확산에 의해 이뤄지며, 2) 탈루배출율은 냉매 잔류량에 비례하고, 3) 냉매 주입 후 배관 등이 밀봉처리되어 있어 재충전은 없는 것으로 설정하였다 (Kim *et al.*, 2013).

위에서 제시한 가정을 토대로 사용단계 동역학식은 아래에서 보는 것처럼 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 EF_u(\%) &= \frac{M_h(t-1) - M_h(t)}{M_h(t-1)} \times 100 \\
 &= \frac{M_{h,0} \cdot \{\exp\{-\varepsilon_h \cdot (t-1)\} - \exp(-\varepsilon_h \cdot t)\}}{M_{h,0} \cdot \exp\{-\varepsilon_h \cdot (t-1)\}} \times 100 \\
 &= \{1 - \exp(-\varepsilon_h)\} \times 100 \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 M 은 어느시간 t 에서의 잔류량 (g), ε 는 탈루배출상수 (yr^{-1}), $M_{h,0}$ 는 HFC-134a의 초기 충전량 (g), 아래첨자 h 는 HFC-134a, EF_u 는 사용 단계 탈루배출계수 (%/yr)이다.

2.2 폐기단계

김치냉장고의 폐기 시 배출량은 다음과 같이 표현된다 (Kim *et al.*, 2013).

$$M_w = M_{h,0} \times EF_w = M_{h,0} \times f_r(1 - \eta) \quad (2)$$

여기서 M_w 는 폐김치냉장고에서의 HFC-134a 배출량

(g), EF_w 는 폐기 단계의 배출계수, f_r 은 폐기 시점에서의 냉매 잔류율을 의미하고, η 는 회수 처리 또는 재활용율을 의미한다. 따라서 폐기단계 탈루배출계수는 아래에서 보는 것처럼 표현이 가능하다.

$$EF_w = f_r \times (1 - \eta) \quad (3)$$

3. 실험장치 및 방법

폐김치냉장고는 수도권 전자제품 리사이클링 센터의 협조를 받아 폐김치냉장고 53대로부터 냉매인 HFC-134a를 회수하여 잔류 중량을 측정하였다.

3.1 냉매 회수장치

본 연구에서는 폐기단계의 냉장고 냉매 회수를 위하여 미국 Yellow Jacket 사의 회수기 (Recover XLT/95763모델)를 사용하였다. 기존 연구의 일반냉장고 냉매 회수기와 동일한 회수기를 사용하였다.

냉매회수기는 R-134a 외에 R-22, R-407, R-410A, R-502를 회수 할 수 있으며 냉매의 종류에 따라 분당 회수능력이 다르다. 또한 회수된 냉매의 중량 측정을 위해 사용한 저울은 정밀도가 $\pm 0.05\%$, 측정 가능한 최대용량이 50 kg이고 최소단위는 2 g이다.

3.2 냉매 회수 및 측정방법

회수기는 4°C 이상에서 작동하므로 겨울철의 냉매 회수 측정은 시도하지 않았다. 김치냉장고의 냉동 및 냉장 시스템은 모든 배관이 밀봉되어 있으므로 배관을 천공하여 냉매를 회수한다.

김치냉장고의 경우 일반냉장고와 동일하게 냉매 회수 과정에서 윤활유가 냉매와 같이 회수되므로 냉매 재활용을 위해서는 오일을 분리 제거해야 한다. 오일과 냉매의 분리는 기존 연구인 일반냉장고 오일 분리시 사용했던 유분리기 (Robin Air Co. 제품)를 사용하였다 (Kim *et al.*, 2013).

3.3 냉매 성분 분석

냉매의 사용 과정에서 냉매 성분 변화가 있는지 여부를 파악하기 위해 김치냉장고용 신냉매와 폐김치냉장고에서 회수한 폐냉매의 성분을 분석하였다. 폐김치냉장고에서 냉매가스 회수 방법으로는 폐김치냉장고 내 배관 호스를 천공하여 압력 게이지 연결 후 밸

Table 1. GC-MSD operation conditions.

Classification	Analysis conditions
Inlet	220°C, Split ratio 100 : 1
Column	DB-624 (60 m × 0.25 mm × 1.4 μm)
Flow	He, 1 mL/min
Oven	40°C (5 min) at 10°C/min at 80°C at 250°C
Scan range	45 ~ 300 m/z (EI mode)

브를 열어 2 L의 테들러백 (Tedlar Bag, RESTEK Co. 제품)에 담아 회수하였다. 각각 GC-MSD (Gas Chromatography-Mass Selective Detector)를 사용하여 분석하였으며, 분석 조건은 표 1에서 보는 것과 같다.

신냉매는 1회용 보관 용기를 통해 가스와 액체 형태로 채취하였으며, 폐김치냉장고에 잔류하고 있는 폐냉매의 경우 가스와 액체 형태로 분류하기 어렵기 때문에 가스 상태로 채취하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 회수량 보정 (Calibration)

Schwarz *et al.* (2005)는 상업용 냉매 회수기를 사용하는 경우 자동차 냉매장치로부터는 10 ~ 20 g 정도가 회수되지 않는다고 보고하였다. 또한 Kim *et al.* (2012a); Kim *et al.* (2012b)도 자동차 냉매장치로부터 HFC-134a의 회수비율은 90%라고 최근 연구에서 밝혔다. 냉매가 100% 회수되지 않는 원인으로는 1) 냉매의 일부가 압축기 오일에 용해되어 손실되거나, 2) 냉매 회수가 어려운 냉매시스템의 취약구간에 머무는 일부 냉매가 잔류하기 때문으로 추정하였다. 이러한 점에 착안하여 본 연구에서 사용한 냉매 회수장치의 회수 능력을 파악하고, 실제 잔류량과 회수량의 차이를 파악하기 위해 회수장치를 보정하였다.

이를 위해서는 김치냉장고의 보정 결과를 적용해야 하나, 김치냉장고의 경우는 냉매 설비가 밀봉 처리되어 있어 냉매 투입이 가능하지 않아 보정할 수 없었다. 대신냉매시스템 및 배출특성이 유사하면서 냉매 투입이 가능한 일반냉장고 보정 결과를 적용하였다 (Kim *et al.*, 2013).

$$M_m = 1.0248 \times M_r + 40.8209 \quad (4)$$

여기서 M_r 는 HFC-134a의 실제 잔류량 (g), M_m 은 회

수기에 의한 회수량(계기 측정값: g)을 말한다. 주입량과 회수량 간의 차이는 1) 회수관 등에 냉매가 잔존하거나, 2) 일부 냉매는 회수되지 않는 한계치가 존재하기 때문으로 풀이된다.

4.2 탈루배출계수 결정

4.2.1 사용단계

사용단계 배출계수 결정을 위해서는 식(1)에서 보는 것처럼 냉매의 잔류량을 측정해야 하나, 사용 중인 김치냉장고에서 냉매 잔류량을 측정하는 것은 현실적으로 불가능하였다. 따라서 폐김치냉장고 53대의 잔류량 정보를 이용하여 간접적으로 사용단계 탈루배출계수를 결정하였다(표 2). 폐김치냉장고의 배출시점에서 잔류량과 사용기간 정보를 활용하면 사용단계 탈루배출상수를 간접적으로 결정할 수 있다.

회수 과정에서 냉매 이외에 윤활유 역할을 하는 압축기 오일도 함께 회수되므로 냉매 재활용을 위해서는 오일을 분리 제거해야 한다. 본 연구에서는 회수한

냉매 중에 오일 함량을 측정하지 못했으나, 김치냉장고와 냉매시스템이 유사한 일반냉장고 결과를 활용하여 오일량 보정값으로 67.7% (1차(22대): 33.3%, 2차(18대): 31.3%)를 적용하였다. 즉 회수된 냉매 중에 순수 냉매의 함량 비율은 67.7%로 추산 적용하였다(Kim *et al.*, 2013).

초기 충전량, 폐기 시점에서의 잔류량, 사용기간을 대입하여 탈루배출상수를 각 폐김치냉장고에 대해서 결정하였다. 표 2에서 보는 것처럼 A업체의 폐김치냉장고 24대의 평균 탈루배출상수는 $0.0386 \pm 0.0121 \text{ yr}^{-1}$ 이었고, B업체의 폐김치냉장고 16대의 평균 탈루배출상수는 $0.0199 \pm 0.0098 \text{ yr}^{-1}$ 이었다(표 3). 또한 표 4에서 보는 것처럼 C업체의 폐김치냉장고 5대의 탈루배출상수는 $0.0420 \pm 0.0438 \text{ yr}^{-1}$ 이었고, D업체의 폐김치냉장고 8대의 평균 탈루배출상수는 $0.0588 \pm 0.0251 \text{ yr}^{-1}$ 이었다(표 4). 조사대상 53대의 평균 탈루배출상수는 95% 신뢰구간에서 $0.0363 \pm 0.0080 \text{ yr}^{-1}$ 이었다.

한편 위에서 결정한 탈루배출상수를 식(1)에 대입

Table 2. Residual rate of HFC-134a in waste Kimchi refrigerator manufactured by A electronic company.

No.	Age (yr)	Capacity (L)	Initial charge amount (g)	Residual rate (%)	Fugitive emission constant (yr^{-1})	Emission factor (%/yr)
1	4.3	220	120	78.5	0.0569	5.5
2	4.3	180	120	82.0	0.0458	4.5
3	4.4	180	120	82.0	0.0449	4.4
4	8.4	227	130	82.1	0.0234	2.3
5	8.5	227	130	76.8	0.0311	3.1
6	9.1	227	180	46.2	0.0851	8.2
7	9.2	132	120	82.0	0.0216	2.1
8	9.2	152	120	73.9	0.0330	3.2
9	9.6	110	115	95.2	0.0051	0.5
10	9.6	110	115	96.4	0.0038	0.4
11	10.0	130	115	80.7	0.0214	2.1
12	10.0	172	105	40.9	0.0895	8.6
13	10.0	132	120	72.8	0.0318	3.1
14	11.8	110	115	71.1	0.0290	2.9
15	11.9	110	115	73.5	0.0258	2.5
16	15.0	132	120	38.1	0.0644	6.2
17	15.0	-	55	70.9	0.0229	2.3
18	15.0	174	135	95.5	0.0031	0.3
19	15.0	110	115	83.2	0.0123	1.2
20	15.0	174	135	57.1	0.0374	3.7
21	15.0	71	55	85.6	0.0104	1.0
22	15.0	130	115	56.6	0.0379	3.7
23	15.0	110	115	24.0	0.0951	9.1
24	15.0	110	115	24.0	0.0951	9.1
Average	11.0 ± 1.5	149.1 ± 19.2	116.7 ± 10.0	69.5 ± 8.9	0.0386 ± 0.0121	3.8 ± 1.1

Table 3. Residual rate of HFC-134a in waste Kimchi refrigerator manufactured by B electronic company.

No.	Age (yr)	Capacity (L)	Initial charge amount (g)	Residual rate (%)	Fugitive emission constant (yr ⁻¹)	Emission factor (%/yr)
1	7.7	95	70	93.0	0.0095	0.9
2	7.8	238	165	71.4	0.0434	4.3
3	7.8	95	70	74.2	0.0382	3.7
4	8.7	95	65	66	0.0479	4.7
5	8.7	132	120	97	0.0035	0.3
6	8.8	132	120	99.3	0.0007	0.1
7	9	158	125	63.2	0.0513	5
8	9.3	91	80	87.4	0.0145	1.4
9	9.3	91	80	95.8	0.0047	0.5
10	10	132	120	97.0	0.003	0.3
11	10	184	130	73.6	0.0307	3
12	10	-	132	88.2	0.0125	1.2
13	10.6	128	85	66.8	0.0381	3.7
14	10.8	120	110	97.3	0.0026	0.3
15	11	120	110	96.1	0.0036	0.4
16	15	-	105	81.8	0.0134	1.3
Average	9.6±0.9	129.4±22.1	105.4±14.9	84.3±7.0	0.0199±0.0098	2.0±1.0

Table 4. Residual rate of HFC-134a in waste Kimchi refrigerator manufactured by C, D electronic company.

No.	Manufactured	Age (yr)	Capacity (L)	Initial charge amount (g)	Residual rate (%)	Fugitive emission constant (yr ⁻¹)	Emission factor (%/yr)
1	C	6.9	192	100	79.0	0.0341	3.4
2		7	192	100	74.8	0.0415	4.1
3		7.8	-	100	88.8	0.0151	1.5
4		8	174	100	44.3	0.1018	9.7
5		11	142	130	82.6	0.0173	1.7
Average		8.2±2.1	175.0±29.3	106.0±16.7	73.9±21.5	0.0420±0.0438	4.1±4.1
1	D	3.3	347	140	76.8	0.0811	7.8
2		3.4	347	140	80.2	0.0645	6.2
3		5.2	145	60	66.7	0.0782	7.5
4		5.5	71	55	85.6	0.0283	2.8
5		6.1	225	105	55.4	0.0972	9.3
6		9.2	123	93	73	0.0343	3.4
7		9.9	156	110	47.8	0.0743	7.2
8		15	120.1	70	83.1	0.0124	1.2
Average		7.2±3.3	191.8±87.8	96.6±27.9	71.1±11.3	0.0588±0.0251	5.7±2.4

하면 A~D 업체의 탈루배출계수(연간 탈루율)은 각각 3.8±1.1%/yr, 2.0±1.0%/yr, 4.1±4.1%/yr, 5.7±2.4%/yr로 결정할 수 있으며, 조사 대상 전체 53대의 평균 탈루배출계수는 3.5±0.8%/yr로 결정할 수 있다. 본 연구에서 제시한 김치냉장고의 평균탈루배출계수는 선행연구에서 결정된 일반냉장고의 평균 탈루배출계수(2.4±0.5%/yr)보다 높게 나타났다. 이는 김치가 유산발효식품이므로 저온이 유지되어야 하기 때문에

유지되는 온도가 일반냉장고에 비해 김치냉장고가 훨씬 낮으므로 연간 탈루율도 김치냉장고가 더 높은 것으로 판단된다.

본 연구에서 결정된 김치냉장고의 평균 탈루배출계수는 우리나라에만 존재하는 것으로 IPCC 기본값이 존재하지 않기 때문에 일반냉장고 사용단계에서의 IPCC 탈루배출계수 기본값 0.1~0.5%/yr를 고려하면 본 연구에서 제시한 탈루배출계수는 상당히 높

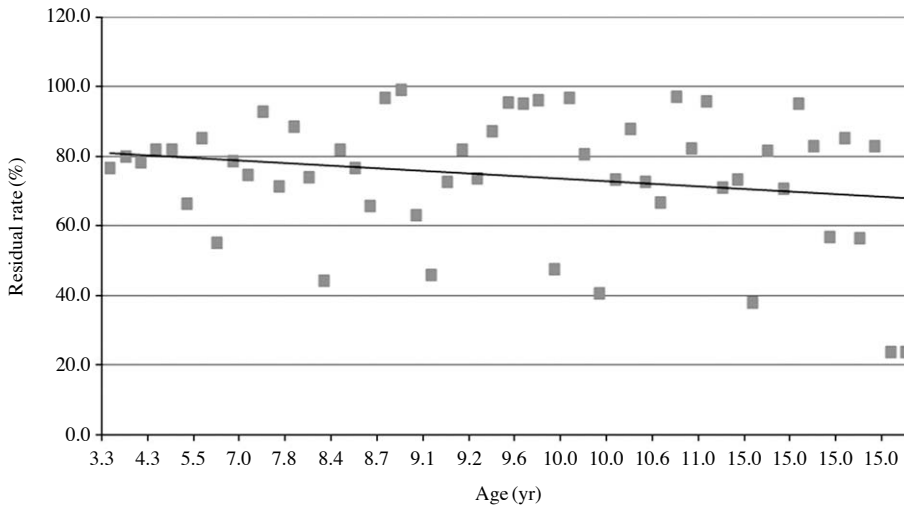


Fig. 1. Apparent residual rate of Kimchi refrigerator with respect to refrigerator age.

은 수준이다. 그러나 IPCC에서 어떻게 탈루배출계수를 결정했는지에 대한 정보가 부족하고 본 연구의 김치냉장고는 대부분 12년 이하의 모델인 반면 IPCC에서는 사용기간이 모두 12~20년 사이의 모델로 계산한 것이기 때문에 정확한 비교 차이 발생 원인을 현재는 밝힐 수가 없는 상황이다. 또한 IPCC에서는 대부분 유럽 및 북미 조사 결과를 토대로 IPCC에서는 기본값을 결정(UNEP-RTOC, 2002)하였기 때문에 본 연구 결과와 차이가 발생했다고 추정된다. 업체별 연간 탈루율은 B업체 ($2.0 \pm 1.0\%/yr$)가 가장 낮았고, A, C, D 업체 순이었다. 그러나 업체별 표본수 차이가 많이 나기 때문에 향후 업체별 표본수를 늘려 신뢰도를 제고할 필요가 있다.

한편 사용기간에 따라 냉매 잔류율은 조금씩 감소하는 양상을 보이고 있으며, 탈루배출계수가 상당히 낮아 ($0.0363 yr^{-1}$) 감소하는 폭은 매우 작게 나타났다. 그림 1에서 보는 것과 같이 구간별로 살펴보면 1구간인 사용기간이 3~8년인 폐김치냉장고의 냉매 잔류율은 77.7%, 2구간인 8~10년 사용한 폐김치냉장고의 냉매 잔류율은 76.3%, 3구간(10~15년)은 69.8%로 점차 감소하는 양상이 관찰되었다.

또한 김치냉장고 용량이 71L~120L인 폐김치냉장고의 연간 탈루율은 $2.6\%/yr$ 이고, 120L~160L는 $3.2\%/yr$, 170L~347L는 $5.2\%/yr$ 로 용량이 클수록 연간 탈루율이 높게 나타났다. 여기서 제품 용량별 초기충

Table 5. Kimchi refrigerator HFC-134a emissions per year.

Year	Kimchi refrigerator production	Emission per year (ton)
2001	1,324,088	5.1
2002	1,510,839	5.8
2003	659,605	2.5
2004	595,127	2.3
2005	635,146	2.4
2006	1,423,876	5.4
2007	1,023,666	3.9
2008	1,053,246	4.0
2009	676,681	2.6
2010	1,044,694	4.0
2011	991,951	3.8
2012	809,966	3.1
Average		3.7

전량의 편차가 크게 나타나는데, 이는 김치냉장고 제조사와 모델마다 다양한 초기충전량 값을 가지고 있기 때문으로 판단되지만 일반적인 김치냉장고의 특성으로 보기에 시료수가 작기 때문에 향후 시료수를 늘려 신뢰도 제고할 필요가 있다.

본 연구에서 조사한 김치냉장고의 평균 초기 충전량 $109.2 \pm 7.2g$ 을 현재 사용 중인 냉장고의 평균 초기 충전량으로 가정하고, 탈루배출상수를 사용하여 연간 평균 탈루량을 추정하였다. 국내 김치냉장고의 평균 사용시간은 11.7년(Capital Electronics Recycling Center, 2010)으로 1년부터 11.7년까지 연간 냉매 탈

Table 6. GC-MSD results for new refrigerant (HFC-134a) and HFC-134a used as refrigerant for Kimchi refrigerators.

Classify	New refrigerant		HFC-134a used as refrigerant	
	A	B	A	B
Retention time (min)	4.5	4.7	4.6	4.7
Area (%)	99.8	0.2	99.9	0.1
Compound	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	1,1,2,2-Tetrafluoroethane	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	1,1,2,2-Tetrafluoroethane

루량을 산정하면 사용중인 김치냉장고의 1대당 연간 평균 3.1 g의 HFC-134a가 탈루된다고 추정할 수 있다. 또한 연간 생산된 김치냉장고 대수와 본 연구에서 제시한 연간 탈루율과 평균 초기충전량을 적용하면 연도별 탈루량은 표 5와 같으며 연간 김치냉장고에서의 평균 탈루량은 3.7 ton으로 추정할 수 있다.

4. 2. 2 폐기단계

김치냉장고 폐기단계의 탈루배출계수는 폐기 시점에서의 냉매 잔류량과 재활용량 정보를 활용해 결정해야 한다. 본 연구에서 조사한 폐김치냉장고의 잔류량 정보는 표 2~4에서 보는 것과 같이 A, B, C, D 업체 각각 69.5±8.9%, 84.3±7.0%, 73.9±21.5%, 71.1±11.3%이었으며, 조사대상 전체 폐김치냉장고의 평균 잔류율은 74.6±5.2%이었다. 선행연구에서 결정된 폐일반냉장고의 평균 잔류율은 75.1±5.2%(n=43대)로 김치냉장고의 잔류율이 더 낮았다. 이는 앞의 사용단계에서 언급한 것처럼 김치냉장고가 일반냉장고에 비해 연간 탈루되는 양이 많기 때문에 잔류하는 냉매가스도 김치냉장고가 더 낮은 것으로 판단된다. 그러나 오차범위내에서 평균 잔류율은 비슷한 수준으로 일반냉장고와 김치냉장고의 구조가 유사하고 측정방법과 방법론이 동일하였기 때문에 두 종류의 냉매배출 특성을 정확히 파악하지는 못하였다. 향후 표 본수를 늘려 일반냉장고와 김치냉장고의 배출특성과 관련한 심도 있는 연구가 필요하다고 사료된다.

최근 연구 (Capital Electronics Recycling Center, 2010)에 따르면 국내 폐김치냉장고의 74%는 리사이클링 센터로 유입되어 냉매가 전량 재활용되고 있으나, 나머지 26%는 민간업체에 의해 수거 처리되고 있으나 냉매는 재활용되지 않는 것으로 나타났다. 또한 리사이클링 센터로 들어오는 폐김치냉장고 중에서 약 79%만이 압축기가 부착된 채로 유입되고 있다. 즉 나

머지 21%는 압축기가 제거되면서 냉매는 전량 탈루배출 되었다고 간주할 수 있다.

위에서 제시한 가정을 토대로 국내 폐김치냉장고 중의 냉매 재활용율은 58% (0.74×0.79=0.58)로 추정할 수 있다. 폐기단계 HFC-134a 탈루배출계수는 평균 잔류율(75%)와 재활용율(58%)를 식(3)에 대입하면 31.5%로 결정할 수 있다. 본 연구에서 조사한 김치냉장고의 평균 초기 충전량 109.2±7.2g과 김치냉장고의 평균 사용기간을 11.7년을 식(1)에 대입하면 폐기시점의 잔류량은 71.4g으로 결정할 수 있다. 이 잔류량에 탈루배출계수 31.5%를 곱하게 되면 폐김치냉장고 1대당 폐기단계에서 배출량은 22.5g이 된다.

4. 3 폐냉매 성분분석

최근에 개정된 자원순환법 (Ministry of Environment, 2012)에 따르면 폐냉매의 경우 순도가 99% 이상이어야 재사용이 가능하므로 폐김치냉장고의 냉매 성분 변화를 파악할 필요성이 있다.

표 6에서 보는 것처럼 신냉매의 주성분 (>99%)은 예상한 것처럼 HFC-134a로 검출되었으며 이성질체인 1,1,2,2-Tetrafluoroethane도 미량 관찰되었다. 폐김치냉장고에서 회수한 폐냉매 성분 분석 결과도 신냉매와 동일한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 이는 일반냉장고의 폐냉매 성분분석과 동일한 결과를 보이고 있으며, 냉장고의 구조와 유지되는 온도로 인한 냉매가스 물성 변화는 없다고 판단된다. 따라서 폐김치냉장고로부터 회수한 HFC-134a를 냉매용도로써 재사용하는데 문제가 없다고 판단된다.

5. 결론 및 시사점

- 1) 본 연구의 측정을 통해 결정된 사용단계 탈루배

출계수는 $3.5 \pm 0.8\%/yr$ 이었으며, 국내 운영 중인 김치냉장고 1대당 연간 4.3 g의 HFC-134a가 탈루된다고 추정할 수 있다. 김치냉장고는 우리나라에만 존재하는 독특한 제품으로 IPCC 기본값이 존재하지 않으므로 일반냉장고 사용단계 탈루배출계수인 0.1~0.5%를 비교해보면 본 연구결과가 다소 높게 나왔다. 하지만 IPCC에서 산정 근거를 제시하지 않고 있고 사용기간과 초기충전량 등 여러 가지 변수로 인해 차이의 원인을 정확히 밝힐 수는 없는 상황이다. 단지 본 연구결과는 국내 상황을 반영하였기에 국내 고유값이라고 할 수 있으나, 표본수가 53대로 대표성을 확보하지 못한 한계가 있다. 그러므로 향후 조사 표본수를 높여 국가 고유배출계수로 발전시킬 필요가 있다.

2) 조사 대상 폐김치냉장고의 평균 잔류율은 $74.6 \pm 5.2\%$ 이었으며 국내 폐김치냉장고의 냉매 재활용율은 58%인 점을 고려하면 김치냉장고의 폐기단계 탈루배출계수는 31.5%로 결정할 수 있다. 이는 IPCC 기본값인 0~80% 범위에 포함됨을 알 수 있다. 폐기단계 탈루배출계수 결과를 활용하면, 국내 김치냉장고 1대당 폐기단계에서 배출량은 22.5 g으로 추산할 수 있다.

3) 조사 대상 냉장고를 업체별·용량별로 구분하여 사용단계 폐기단계에서의 배출계수를 결정하였다. 업체별 사용단계 배출계수는 A, B, C, D 각각 $3.8 \pm 1.1\%/yr$, $2.0 \pm 1.0\%/yr$, $4.1 \pm 4.1\%/yr$, $5.7 \pm 2.4\%/yr$ 로 차이가 났지만 이는 업체별 표본수의 차이가 많이 나기 때문이므로, 향후 업체별 시료수를 맞춰 신뢰도를 높일 필요가 있다. 또한 용량별 탈루율은 2.6%/yr (71 L~120 L), 3.2%/yr (120 L~160 L), 5.2%/yr (170 L~347 L)로 용량이 클수록 연간탈루율이 높게 나타났다. 따라서 HFC-134a의 배출특성은 제조업체와 용량에 관계가 있음을 확인하였다.

4) 폐김치냉장고에서 회수한 폐냉매 성분 분석 결과가 신냉매와 유사하였으며, 이는 냉장고 작동으로 인하여 냉매가스의 물성이 크게 변하지 않아 폐냉매의 재사용이 가능할 것으로 여겨진다. 그러나 냉매 회수 과정에서 압축기 오일이 30% 정도 포함되기 때문에 냉매 재사용을 위해서는 오일 분리가 전제되어야 한다. 그러므로 냉매 재활용을 위한 제도를 만들 때 냉매 회수방법과 오일 분리 방법 및 기준 등을 마련해야 한다.

5) 폐김치냉장고로부터 냉매잔류율 측정결과 폐일

반냉장고보다 잔류하는 양이 작았다. 이는 김치냉장고가 보관성에 치중을 두고 개발되었기 때문에 유지되는 온도가 낮아 연간 탈루되는 양이 더 많기 때문이라고 판단된다. 하지만 냉매의 순환 시스템이 유사하고 일반냉장고의 냉매잔류 측정방법과 방법론등 중복되는 부분이 많기 때문에 정확한 차이점이 파악되지 않았다. 향후 표본수를 늘려 탈루량 차이의 원인 규명과 배출특성에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

감사의 글

연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

References

- Capital Electronics Recycling Center (2010) Life Cycle report.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 3, 7.80-7.92.
- Kim, S., E.K. Kim, H. Kim, Y.P. Lee, S. Byun, H.J. Seo, and S. Lee (2012b) Estimation of EF (Residual Rate) and Inventory of HFC-134a from Mobile Air Conditioners of Scrap Vehicles, Korea Society of Waste Management, 29(7), 650-661.
- Kim, S., E.K. Kim, H. Kim, Y.P. Lee, S. Byun, J.A. Lee, and H.J. Seo (2013) Fugitive Emission Characteristics of HFC-134a from Scrap Domestic Refrigerator, Korea Society of Waste Management, 30(2), 112-118.
- Kim, S., S. Kim, and E.K. Kim (2012a) Development of Fugitive Emission Model of HFC-134a from Mobile Air Conditioner of Passenger Automobiles, Korea Society for Atmospheric Environment, 28(5), 518-526.
- Korea Environment Institute (2009) Study of Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling System Improvement, 31-49.
- Korea Refrigeration And Air-Conditioning Industry Association (2011) Refrigeration and Air Conditioning equipment production/shipment statistics.
- Ministry of Environment (2012) Act on resource recycling electrical and electronic products and automobiles.
- Schwarz, W., J. Harisch, A. Koppenol, and M. Vainio (2005)

- Establishing HFC Use-Phase Emissions Rates of Mobile Air Conditioners in Passenger Cars, Öko-Recherche GmbH. Germany, 1-8.
- Stemmler, K., S. O'doherty, B. Buchmann, and S. Reinmann (2004) Emissions of the Refrigerants HFC-134a, HCFC-22, CFC-12 from Road Traffic: Results from a Tunnel Study, Environ, Sci. Technol., 38, 1998-2004.
- UNEP-RTOC (2002) 2002 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Option Committee.