

자동차 대체냉매 R-744, HFO-1234yf 의 비교 LCA

배유진 홍성준 조희욱 홍병권 유진영 성낙섭

현대·기아자동차㈜

Comparative LCA on Alternative Refrigerants : R-744, HFO-1234yf

Bae, Yu Jin Hong, Sung Joon Cho, Hee Wook Hong, Byoung Kwon Yoo, Jin Young
Sung, Nak Sup

Research & Development Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation

ABSTRACT

Comparative environmental evaluation for possible alternative refrigerants (R-744, HFO-1234yf) is performed using by LCA (Life Cycle Assessment) which is one of the most famous tools. Based on ISO 14040 series, LCA is performed through the production, use, and disposal stage of each air conditioner system, and the result would be shown which refrigerant is more environment friendly. The environmental profile of all the refrigerant will be used for decision supporting information.

요약문

주제어: LCA, 대체냉매, Eco-efficiency, R-744 (CO_2), HFO-1234yf (CF_3CFCH_2)

1. 서 론

전세계적으로 지구온난화로 인한 환경문제가 심각해짐에 따라 자동차 관련 환경법규가 강화되고 있다. EU MACs (Mobile Air Conditioning systems)에서는 지구온난화 지수가 (GWP : Global Warming potential) 150이 넘는 냉매의 사용을 신차의 경우, 2011년 1월 1일, 기존차는 2017년 1월 1일 이후부터 금지하고 있다. 현재 자동차에서 사용중인 R-134a(CH_2FCF_3) 냉매는 GWP가 1,300으로 규제시점 이후로는 사용이 불가능하다. 따라서 전세계 자동차 회사 및 냉매 회사에서는 이를 대체할 냉매를 개발해오고 있으며, 각 대체 냉매의 성능과 안전, 효율성 등을 평가하여 가장 적합한 냉매를 연구하고 있다.

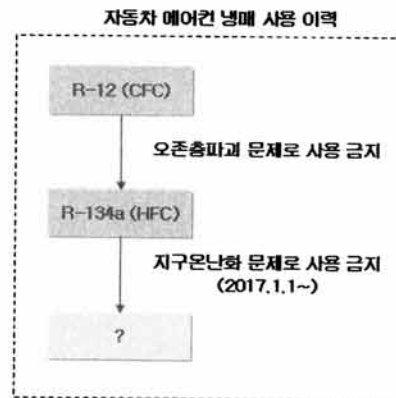


Fig 1. 자동차 에어컨 냉매 사용이력

현재까지 차세대 냉매의 유력한 후보로는 R-744

(CO₂) 냉매, HFO-1234yf(CF₃CFCH₂) 냉매로 압축할 수 있다.

이 두 냉매의 경우, 유럽과 일본 및 북미의 자동차 회사에서도 각종 평가를 진행 중에 있으며 현재까지의 연구 결과로는, R-744 냉매는 지구온난화지수가 1 로써, HFO-1234yf 가 4 임에 비해 낮다. 그러나 기존의 에어컨 시스템 대비 8 배의 고압 조건이 필요하여 시스템 전체 부품을 새로 개발해야 하는 단점이 있다. 또한 고온 상태에서 성능 및 효율 저하, 냉매 누출 시 측정의 어려움, 차내 냉매 누출시 졸음 운전 유발 등이 문제점으로 지적되고 있다.

다음 Table 1 은 냉매별 에어컨 시스템의 주요 특징을 설명한 것이다. Table .1 과 같이, R-744 는 GWP 가 1 로써 가장 낮으나, 에어컨 시스템 제조비용이 많이 든다. 기존 R-134a 시스템의 제조비용을 100 으로 볼 때 R-744 는 약 150 의 비용이 소요된다. 반면, HFO-1234yf 는 기존 시스템과 유사한 시스템 제조비용이 소요된다.

Table 1. 각 냉매시스템의 주요 특징

대체 냉매			
	R-134a System	R-744 System	HFO-1234yf System
lay-out			
GWP	1,300	1	4
비용	100	150	103.5
냉매 충전량	610 g	290 g	550 g
총중량	26.3 Kg	26.8 Kg	23.8 Kg
화학식	CH ₂ FCF ₃	CO ₂	CF ₃ CFCH ₂

R-744 냉매는 에어컨 성능 측면에서 비폭서지에서는 HFO-1234yf 보다 좋으나, 폭서지에서는 더욱 악화된다. 또한 기존냉매를 포함한, 세 가지 냉매 중 Idle 시 가장 열세한 성능을 내고 있는 것으로 평가되었다.

현재 노르웨이 Sintef 가 원천기술을 보유하고 있으며 독일 자동차협회(VDA)는 독일 자동차의 대체 냉매로 채택할 것을 공식 발표하였다. (' 07.11)

반면, HFO-1234yf 냉매는 기존 에어컨 시스템을 거의 그대로 사용할 수 있는 장점이 있으나, 기존 시스템대비 3~5%정도 성능이 떨어지는 단점이 있다. 또한 약가연성 냉매로 화재 안전성에 대한 대책이 필요하며, 현재 미국을 중심으로 냉

매의 장기 독성평가 및 안전성 검증이 마무리 단계에 있다.

이 냉매는 미국의 듀폰과 하니웰이 공동 개발했으며, 현재로는 미국, 일본, 프랑스 등이 지지의사를 표명하고 있는 중이다.

그러나 아직까지 국내외 완성차 및 공조 업체들 간 대체냉매를 두고 지속적인 연구와 개발을 진행 중에 있으며, 어느 냉매가 최종 냉매로 채택될지 아니면 이원화로 가게 될 지의 여부는 미지수이다.

본 연구에서는 상기 여러 연구와 함께 각 냉매별 에어컨 시스템을 기준으로 전과정 환경성 평가를 실시하였다. 또한, 지속가능개발 측면에서의 고려를 위해 eco-efficiency 기법을 사용하여 환경 영향과 경제성을 고려한 냉매시스템별 환경효율성을 평가하였다. 이를 바탕으로 향후 대체냉매의 사용 및 선정기준의 참조자료로 활용될 수 있으리라 사료된다.

2. 전과정 환경성 평가 (LCA)

2.1 목적 및 범위 정의 (Goal and scope definition)

2.1.1 연구 목적 (Goal Definition)

본 연구의 목적은 R-744 (CO₂)냉매와 HFO-1234yf (CF₃CFCH₂), 두 대체냉매의 전과정의 환경성을 비교 분석하는 것이다.

2.1.2 연구 범위 (Scope Definition)

본 연구의 대상은 대체냉매 2 종류 (R-744 (CO₂), HFO-1234yf(CF₃CFCH₂))와 기존 냉매 R-134a(CH₂FCF₃) 및 각 냉매를 포함한 에어컨 시스템 전체로 하였다. 냉매가 교체될 때, 에어컨 시스템의 변화도 수반되기 때문에 차량에 장착된 에어컨 시스템 전체를 연구대상으로 삼았다. 대상 차량은 디젤 엔진 2000cc급 SUV 차량으로 선정하였고, 차량 주행 시나리오는 EUCAR guidelines¹ (1998)에 의거하여 12 년 15 만 Km를 주행하는 것으로 가정하였다.

¹ EUCAR : European Council for Automotive R&D

Table 2. 기능 및 기능단위

기능	차량의 실내 공조
기능단위	SUV 2.0 디젤엔진 (12년/15만Km) 주행 차량 1대에 장착된 에어컨 시스템 및 에어컨 냉매
기준흐름	각 냉매별 에어컨 시스템 1 SET

2.2 전과정 목록분석 (Life Cycle Inventory Analysis)

제품 시스템 경계는 Fig.2 에서 보는 바와 같이 원재료 채취에서부터 원재료 가공, Sub 부품 제조, 제품 조립, 사용, 폐기 단계로 설정하였다. 데이터 범주는 원/부자재, 에너지, 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 폐기물로 분류하였다. 제품 생산에 직접 투입되는 원/부자재 및 공정 소모자재 등이 포함되고 에너지는 전기와 가스 사용량을 고려하였다. 대기/수계 배출물 및 폐기물은 공장 내에서 발생하는 배출물과 자동차 에어컨 가동 시 배출되는 물질, 폐기단계에서 배출되는 물질을 고려하였다.

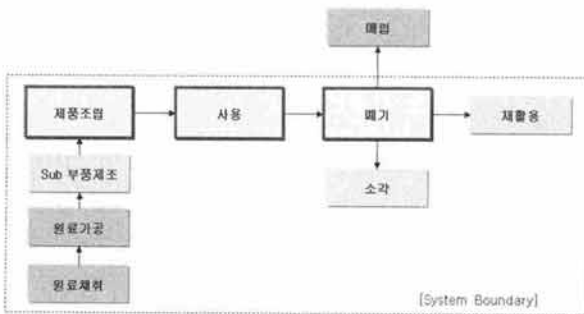


Fig 2. 시스템 경계(물질 흐름도)

2.2.1 데이터 수집

1) 제조 단계

제조는 부품제조 업체로부터 설문서를 이용하여 제품을 생산할 때 투입되는 투입물 (원/부자재), 에너지 (전기/Propane), 용수 그리고 배출물에 대한 현장 데이터를 수집하였다.

2) 사용 단계

에어컨 연간 가동일은 117 일로 가정하였다. 이는 2006년 ~ 2007년 국내 최고가온이 25℃를 초과한 평균일수이다. (기상청 통계자료) 사용단계에서는 에어컨 가동으로 인한 연료소모량 (디젤)을 투입물로 입력하였고 발생하는 차량의 배출가스를 배출물로 가정하였다. 본 연구에서는 차량

1 대 내에 장착된 에어컨 시스템이 기준이기 때문에 주행시의 연료 투입량과 배출가스는 차량 내에서 에어컨 시스템이 차지하는 중량만큼 할당하였다. 연비 및 배출가스는 지식경제부, 환경부 인증 데이터를 사용하였다.

냉매 누설량은 차량이 고장이 나지 않는 이상 매우 미미한 수준이므로 본 연구에서는 생략하였다. 또한 부품의 수명 역시 사고가 발생하지 않을 시 폐차시까지 사용할 수 있으므로 정비 및 교환과정은 고려하지 않았다.

각 시스템별로 에어컨 가동 시 연비손실을 산출을 위해 벤치테스트를 실시하였다. 벤치테스트 평가 조건은 아래 표 3과 같다.

Table 3. 벤치테스트 평가 조건

비교 항목	벤치 공조 연비 모사
평가 조건	<ul style="list-style-type: none"> ▶주행 : SC03 RPM 실차데이터 이용 ▶온도/습도 : 35 °C x 40% RH ▶Sun Load : 없음 (별도 온도 부하로 보상) <ul style="list-style-type: none"> - 실내유입 온도 = 25 °C → 30 °C ~ 40 °C ▶평가 시간 = 600 초
평가 결과 (결과물)	<ul style="list-style-type: none"> ▶부품 부하 측정 <ul style="list-style-type: none"> - Compressor Torque - Blower, Fan 부하량은 실차 계측, 평균치 적용 ▶최종 실차 검증 이전, 공조 부품별 <ul style="list-style-type: none"> - Compressor 용량 최적화 목적
소요일 계산 결과물	$Work = \int Torque \times rpm \times dt$

벤치 테스트 결과를 이용하여 NEDC² 모드로 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 실시결과는 아래 그림과 같다.



R-134a	R-744	HFO-1234yf
-2.6%	-5.1%	-3.2%

Fig 3. 에어컨 연비 손실률 (시뮬레이션 결과)

² NEDC : New European Driving Cycle

3) 폐기 단계

본 연구에서는 일반적인 자동차 폐차 처리와 동일한 방법으로 제품 중량의 약 50%를 차지하는 Al, Cu 등의 금속류는 재료재활용, PP 등의 플라스틱 종류는 소각을 통한 열 회수, 그 외 재질은 매립 처리되는 것으로 가정하였다.

제조공정에서 발생하는 금속스크랩 역시 다시 재활용 될 수 있는 자원으로 가정하였고, 에어컨 냉매는 대기 방출하는 것으로 시나리오를 세웠다.

2.2.2 Process Flow Chart 작성 및 DB 연결

제조, 사용, 폐기 각 단계마다 수집된 데이터를 바탕으로 물질 및 에너지 흐름표를 작성하였고, 물질 제조시의 원부자재 제조 DB 는 Ecoinvent 등의 상용 DB 를 활용하였다.

에어컨 시스템 제조 시 투입/배출되는 물질들을 입력하고, 각각의 입력된 물질들의 제조 DB 를 연결하였다.

2.3 전과정 영향평가 (Life Cycle impact assessment)

본 연구에서는 국내 환경성적표지제도 (EDP: Environmental Declaration of products) 시행 시 적용하는 6개 영향범주 중 오존층 파괴지수를 제외한 5개 영향평가 범주를 평가범위로 선정하였고 특히, 지구온난화를 가장 중점적으로 다루었다. (오존층 파괴지수는 1987년 몬트리올 의정서 발효 이후 R-134a 를 포함한 대체냉매 모두 0이다.) 5개의 영향평가 범주는 지구온난화, 부영양화, 산성화, 광화학산화물생성, 자원고갈이며 영향평가의 단계 중 특성화 지수까지 평가를 하였다.

각각의 영향평가 방법론은 아래의 Table 4.와 같다.

Table 4. 영향평가별 방법론

영향평가 범주	방법론
지구온난화	Climate change (IPCC 2001)
산성화	CML 2001/acidification potential
부영양화	CML 2001/eutrophication potential

광화학산화물생성	CML 2001/photochemical oxidation (summer smog)
자원고갈	Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment, 1995

Fig.4 는 그 평가결과이다. 기존의 R-134a 냉매 (녹색선)를 기준으로, 빨간색 선은 R-744, 파란색 선은 HFO-1234yf 이다.

아래 그래프를 보면, HFO-1234yf 가 광화학산화물 생성을 제외하고 전 항목에서 R-744 보다 환경영향이 낮은 것을 알 수 있다.

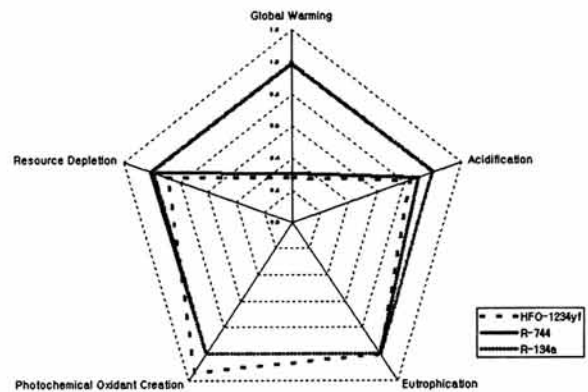


Fig 4. 영향평가 결과 (방사형 그래프)

광화학산화물생성 (Photochemical Oxidant Creation)과 자원고갈 (Resource Depletion)을 제외한 전 항목에서 두 대체냉매 모두 R-134a 보다 환경영향이 낮은 것으로 평가되었고, 특히 지구온난화는 70%이상 낮은 것으로 평가되었다.

지구온난화 영향평가는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 영향평가 지수 값을 사용하였고, 지구온난화에 영향을 미치는 물질들을 CO₂ - equivalence 값으로 환산된 수치를 사용하였다.

아래 그래프는 각 단계별 영향평가 결과이다. 제조, 사용, 폐기 단계별 영향평가 결과를 볼 수 있고, 폐기 단계는 재료재활용 및 열회수로 인해 환경부하가 상쇄되는 것을 볼 수 있다.

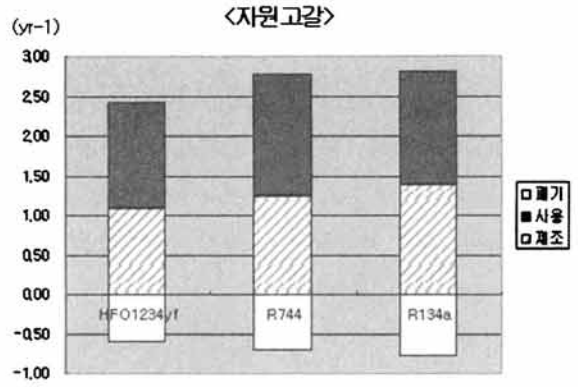
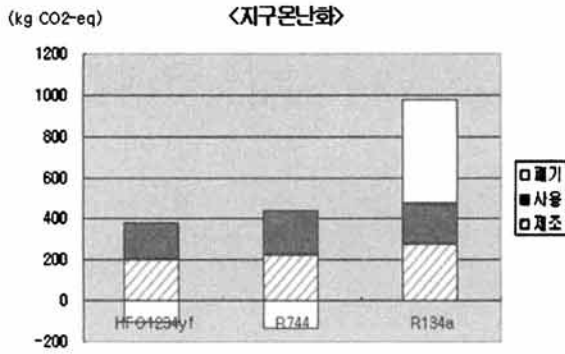
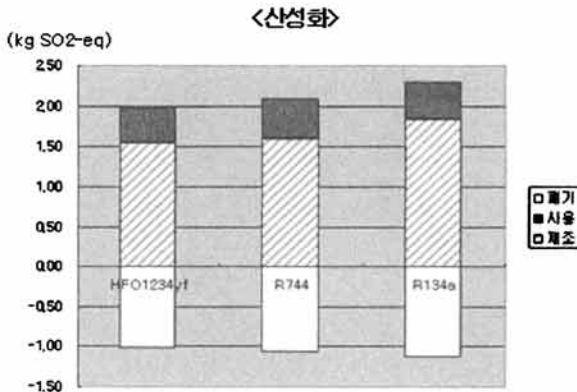
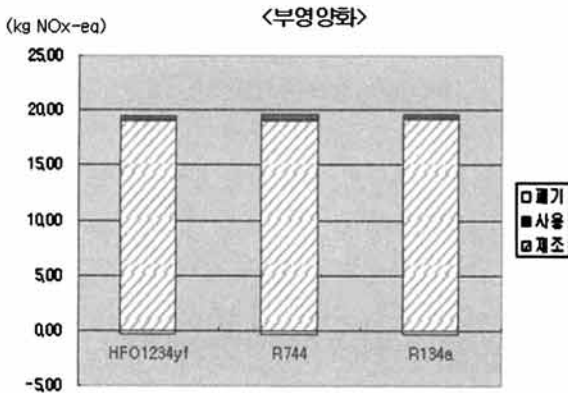


Fig 5. 영향평가 결과 (단계별)

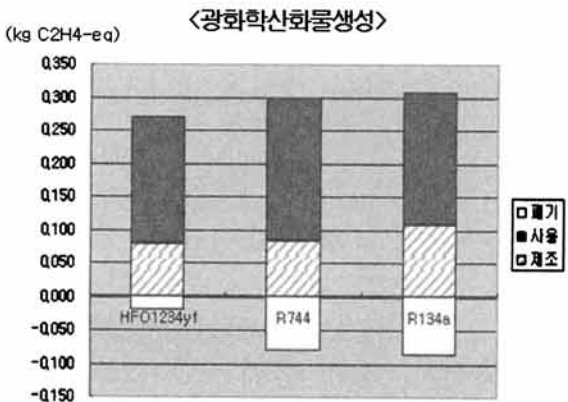


2.4 전과정 해석 (Life Cycle Interpretation)

위 Fig.5의 결과를 분석결과, 두 대체냉매 모두 기존 R-134a 보다 지구온난화 환경부하물질 배출량이 현저히 감소하며, HFO-1234yf의 경우, 기존냉매 대비 약 700 kg의 CO₂-eq 배출량이 감소됨을 알 수 있다. R-134a의 GWP가 CO₂의 1300배 정도 되므로, 폐기단계에서의 재료재활용이나 에너지 회수로 인한 credit을 포함하여도 다른 냉매대비 약 2~3배 가량 많은 CO₂를 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 전과정으로 볼 때 R-134a가 가장 지구온난화 영향이 크고, HFO-1234yf가 가장 적은 영향을 미치는 것으로 평가되었다.



R-744의 경우 고압조건을 견디기 위한 부품 제조로 냉매시스템보다 Al과 Cu의 사용량이 증가되어 제조단계 영향이 증가되었다. LCA 결과 Al으로 인한 영향이 1순위로 높으며 그 다음으로는 전력 사용으로 인한 영향이 높다. (R-134a의 전력 사용 영향의 2배 정도)



사용단계에서는 에어컨 가동에 따른 R-744의 연비손실이 가장 크고 중량도 가장 무거운 사용단계에서의 지구온난화 영향이 가장 큰 값을 나타내고 있다. 그러나 폐기단계에서 냉매 방출로 인한 지구온난화 영향이 적어서 기존 냉매보다 약 680kg의 CO₂-eq 발생량이 적은 것으로 분석된다.

HFO-1234yf는 가장 낮은 지구온난화 영향을 보이고 있다. 이는 세 냉매시스템 중 중량이 가장 가볍고 제조단계에서의 Steel과 Al 사용량이 가장 적은 것과 또한 연비손실이 가장 낮은 것이 주요 이유로 볼 수 있다.

또한 광화산화물생성을 제외한 나머지 3 가지 항목 (산성화, 부영양화, 자원고갈)에서도 HFO-1234yf가 R-744 보다 환경부하가 적음을 알 수 있다. 산성화의 경우, 제조단계가 가장 큰 부분을 차지하고 있는데 이 중 Al, Cu 제조 시 발생하는 부하와 전력사용에 의한 부하순으로 가장 큰 영향을 미치고 있는 것으로 평가되었다.

부영양화의 경우, 세 냉매가 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 약 80%가 에어컨 제조 공장에서 발생하는 Nitrogen 이 주요 원인물질로 규명되었다.

광화산화물 생성은 사용단계가 가장 큰 부분을 차지하는데 사용단계의 80%가 디젤연료 생산에서 발생하고 나머지 20%가 주행과정에서 발생된 것으로 분석되었다. 제조단계에서는 Al, PP, HDPE, 전기 생산에서 90% 이상 발생되고 있다.

자원 고갈은 60% 이상이 사용단계에서의 연료생산에서 사용되는 crude oil 에서 가장 큰 부하를 나타내고 있다.

3. 환경 효율(Eco-efficiency)

WBCSD³에 의하면 환경효율이란 인간의 요구와 삶의 질을 만족하기 위해 제공되는 서비스와 제품의 가격이 생태영향과 자원영향에 어떠한 발전을 이루었는지에 대한 것을 파악함으로써 성취될 수 있다.” 라고 정의되어 있다.

본 연구에서는 환경효율을 이용하여, 대체냉매의 환경성과 경제성을 동시에 평가해보았다.

$$\text{환경효율 (Eco-efficiency)} = \frac{\text{경제적 가치 (Economic Value)}}{\text{환경영향 (Environmental Load)}}$$

Fig 6. 환경 효율의 정의

이러한 환경효율 계산을 위한 경제적 가치는 여러 가지 항목으로 나타낼 수 있지만, 본 연구에서는 제품 제조 시 투입되는 비용의 역수를 분자로 취하였고, 환경 부하는 LCA 수행결과 산출된 CO₂ 전과정 배출

량 (Total CO₂-eq 값)으로 계산하였다. 제품의 가격은 R-134a 를 기준으로 R-744 가 약 1.5 배 비용이 더 많이 들고 R-134a 와 HFO-1234yf 는 거의 차이가 없다.

환경효율 평가결과는 아래 그림과 같다. HFO-1234yf 의 환경 효율이 세 냉매 중 가장 좋은 것으로 평가되었다.

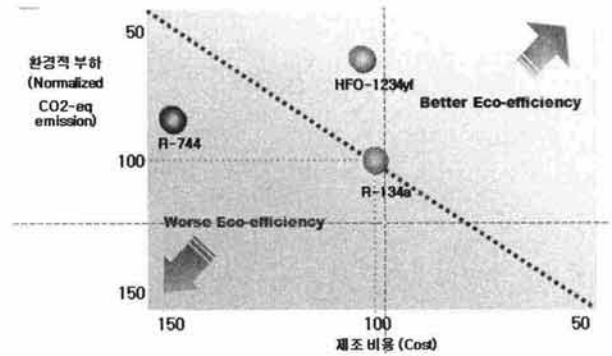


Fig 7. Eco-efficiency 평가 결과

4. 결 론

지속가능한 개발 (Sustainable Development) 이란, 현재 세대의 개발욕구를 충족시키면서도 미래세대의 개발능력을 저해하지 않는 '환경친화적 개발'을 의미한다. 즉, 사회 전 분야에서 각종 개발에 앞서 환경 친화성을 먼저 평가해 정책에 반영함으로써 미래세대가 제대로 보존된 환경 속에서 적절한 개발을 할 수 있도록 하는 것을 말한다. 자동차 대체냉매의 경우도 예외는 아니다. 경제적이고, 규제를 만족하는 수준을 벗어나 제품이 제조, 사용, 폐기 시 어떤 환경적 영향을 미치는지를 평가해보는 것이 중요하다.

본 연구를 통해서 두 대체냉매들의 전과정 환경성을 비교해 볼 수 있었고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) LCA 연구결과, 현재 이슈가 되고 있는 지구온난화의 경우, HFO-1234yf 가 전과정에서 기존 냉매대비 약 700kg 의 CO₂-eq 배출량이 감소됨을 알 수 있다. (R-744 는 684 CO₂-eq 이 감소됨)
- (2) 광화산화물생성을 제외한 부영양화, 산성화, 자원고갈에서도 HFO-1234yf 가 R-744 보다 환경부하가 낮음을 알 수 있다.
- (3) 환경효율 측면에서 HFO-1234yf 가 R-744 보다 더 우수한 것으로 평가되었다.

³ WBCSD : World business Council for sustainable Development

참고 문헌

1. ISO 14040, 14044, 2006
2. LCA 기법연구 I,II (The Study of LCA Methodology),이건모, 1997-1998
3. EUCAR Project R3: Life Cycle Analysis Data and Methodologies, Phase 2, Final report Sept, 1998
4. 환경 전과정 평가의 이론과 지침, 한국 품질환경 인증협회, 1998
5. Eco-efficiency Indicator Handbook for Projects, JEMAI, 2004
6. 자동차 에어컨 친환경 대체냉매 (국제 규제 및 표준화 동향, KATS 기술보고서 제 2 호), 지식경제부 기술표준원, 2008