

## CFC 냉매 사용금지가 에너지 이용에 미치는 영향 How will CFC bans affect energy use?\*

- 장기적 영향에 대한 평가와 대체 기술의 개발 -  
An evaluation of long-term impact and  
the development of alternative technologies

F. K. Fischer and F. A. Creswick\*\*, 김 중 보\*\*\*  
Chong Bo Kim

냉동기, 가전기기, 건물 단열 등을 다루는 산업에서는 요즘 소위 “게임의 규칙”이란 것이 급속히 변하고 있다. 이는 얼마까지 않아 염화불화탄소(Chlorofluoro carbons) 11, 12, 113, 114, 115의 공급이 절대적으로 부족하게 될 것이기 때문이다. 잘 알려진 대로 이미 몬트리올 협정이 24개국에 의하여 조인되었고 이 협정을 현실화하기 위한 노력이 이미 시작되고 있다.

美환경보존국(EPA)은 현재 CFC 냉매들에 대한 생산을 점차적으로 삭감하는 법안을 마련중에 있다. 즉, 우선 1989년에 1986년의 생산 수준으로 생산량을 낮추고 1993년까지 총생산량을 20% 감소시키며, 1998년까지는 또다시 30% 감소시키는 안이다.

비에어로졸(non-aerosol) 계통의 응용에 대한 CFCs의 생산은 최근 15년동안 매년평균 6.5% 이상의 비율로 증가해 왔다(미국은 1975년에 대부분 에어로졸에 대한 CFCs의 사용을 금지했음). 그림.1은 1972년과 1985년 사이에 에어로졸 분사에 사용되지 않은 CFCs 11, 12, 113과 Halon 1301(상대적인 오존층 파괴 잠재력에 대한 생산량)의 총생산량을 보여 준다.<sup>1,2)</sup> 이는 CFCs 114, 115와 Halons 1211, 2401 등과 같은 소량의 생산은 포함되지 않

은 수치이다. 1989년에 1986년의 생산수준으로 되돌아 간다는 것은 이미 1988년의 생산량에는 13%, 1989년의 예상생산량의 20%의 삭감을 의미한다. 그러므로 벌써 CFCs의 부족은 현실화되고 있다.

美에너지성(DOE)은 CFCs 사용규제가 에너지 효율과 국가 장래 에너지 이용의 상당량을 점유하는 주요산업의 생산품에 미치는 영향을 우려하고 있다. 한 국립연구소는 장기적인 관점의 에너지 이용에 미치는 영향에 대한 평가연구를 요청받았으며, 이 평가에 의하여 DOE는 가능한 대체 기술에 대한 연구와 개발(R & D)의 지원을 가부간에 결정하려 하고 있다. 이 연구 결과는 DOE와 그 관련기관들이 어떤 분야의 R & D를 지원하여야 하는지 등 장래의 계획을 세우는데 사용될 것이다.<sup>3)</sup>

### 1. CFC 대체냉매

에너지 사용평가에 대한 첫번째 단계는 CFCs 사용을 요하는 응용분야와 가능한 대체냉매의 종류, 사용기술을 정확히 파악하는 일일 것이다. CFCs를 사용하는 응용분야는 증기압축냉

\* 원문 ASHRAE Journal, Nov., 1988.

\*\* ASHRAE Member

\*\*\* 번역, 정회원, 인하대학교

동시시스템이나 폼(foam) 단열재 제작 등 12개의 응용분야로 먼저 분류하고 있다. 또 이 응용분야들에 CFCs를 대체 냉매로 대체하기 위하여 다음 다섯가지를 생각해야 할 것이다.

즉 기존의 기술, 실용성이 있는 대체냉매, 성능에 의문이 있으나 후보로서의 대체냉매, 또 최악의 경우 시나리오와 첨단기술 개발 등으로 요약할 수 있다. 정책적으로 CFCs의 완전폐지에 관한 분석의 기초자료 마련을 위하여서는 장기간 연구개발을 수행하여야 하고, 많은 산업체들에의 단기적 영향을 예측하기 보다는 에너지 사용의 장기적 영향을 고려해야 한다고 DOE는 판단하고 있다. 이러한 노력은 성층권의 오존층 보호와 관련된 문제와 산업계가 CFC 대체물 사용에 어떻게 적응할 것인가 하는 문제에 직접적인 연관성을 가진다.

기존의 기술은 CFC-11과 CFC-12를 증기압축 냉동장치와 polyurethane, polyisocyanurate, polystyrene 등 폼 단열재 제작에 사용하고 있다. CFC-12는 냉장고, 냉동기, 차량용 공기조화기, 냉장자동판매기와 식료품진열장 그리고 각종 소형 가정·사무용 가전기에 사용된다(제습기, 식수대 등) CFCs-11과 CFC-12는 상업용 건물에서 원심 냉각장치에 사용되고 있으며, CFC-114는 해군의 군함용 냉동장치로 많이 사용되고 있다. 규제대상 냉

매의 하나인 CFC-115는 저온, 중온의 냉각응용에 사용되는 HCFC-502의 구성물질로서 이용되고 있다. CFC-11이나 CFC-12를 포함하는 고체형 폼의 플라스틱 단열재들은 CFC로 채적을 불러서 플라스틱 공간을 채우는 방법을 사용하며 냉장고, 냉동기, 온수기 등에 절연을 위하여 폭 넓게 이용되고 있다. 이렇게 만들어진 폼 단열판은 저렴한 비용과 그 낮은 열전도도 때문에 주거·상업용 건물에서도 많이 사용되고 있다.

이러한 응용에서의 CFCs 냉매에 대한 이상적인 대체냉매는 CFC-11과 12의 특성과 유사하며 환경오염을 주지 않는 화학적 혼합물이어야 할 것이다. 이는, 대체냉매가 사용되었을 때 기존 생산설계의 변경을 최소화하여야 하며, 생산비용을 최소화하여야 함을 의미한다. CFC-12에 대한 대체방법과 같이 CFC-11과 HFC-134a에 대한 대체냉매로서 현재 가장 적합하다고 판단되는 것은 HCFC-123과 HCFC-141b이다. 이러한 화학 혼합물들은 저기압에서 분해될 수 있도록 탄화수소 결합물을 포함하며 염소성분을 전혀 포함하지 않는다. 결과적으로 성층권의 오존층 파괴에 대한 위협을 주지 않는다.

몇가지 공학자료는 HFC-134a, HCFC-123과 HCFC-141b에 대한 이용가능성을 보여주고 있다. HCFC-141b를 사용한 폼 절연체 샘플에 대한 열전도도는 기존 CFC사용의 폼재질보다 약 5~9% 높은 값을 갖는다. 냉매의 대체 작업은 냉동장치에서 이러한 화학물들을 실제 사용해 봄으로써 시작된다. 즉 HFC-134a에 대한 초기시험결과, 냉각시스템의 설계 변화를 하지 않은 상태에서 CFC-12와 비교하여 8% 이상 효율이 감소할 것으로 나타났다. 이러한 효율의 감소는 열교환기, 압축기 혹은 팽창장치들의 수정으로 개선될 수 있는 것이다.

그 이외에 실용성이 의문시되는 대체냉매들은 결국 소비생산품에의 사용이 금지될 것으로 예상되지만, 금지가 안된 현재로서는 규제가 필요하다. 그러므로 이를 개선하는 새로운 냉매의 개발이 절실한 실정이다. 대체냉매는

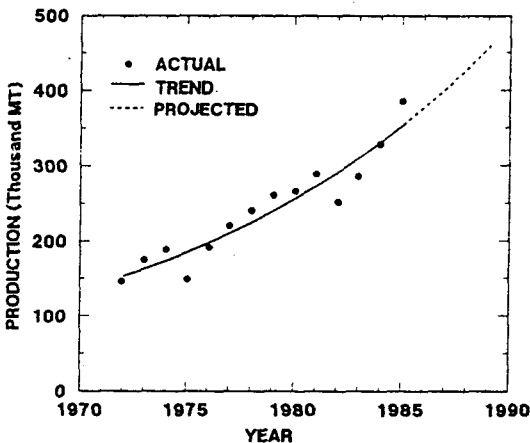


Fig.1 Historical growth of composite production of CFCs 11, 12 and 113 and Halon 1301 for non-aerosol applications(weighed by ozone-depleting potentials)

장기간의 시험을 거쳐 그 유독성 유무를 확인하여야 하는데 HFC-134a는 제작 공정 과정에서 재질과의 접촉을 피하는 윤활유의 사용이 현재로서는 없으며 HCFC-123과 HCFC-141b는 그 용해특성상 가정용 냉장고와 냉동기에 사용되는 플라스틱 라이너(liners)와 접촉했을 때 문제를 일으킬 수 있다.

앞으로 좀더 효과적인 대체냉매가 성공적으로 개발되지 않는다면, 현재로서는 HCFC-22가 가장 우수한 대체냉매라고 할 수 있다. 그리고 가장 우수한 대체 단열재는 폴리스티렌(EPS) 비드판이다. HCFC-22와 EPS절연체의 장점은 기존 CFC냉매응용 분야를 간단히 대체할 수 있는 가장 효과적인 기술이기 때문이다. HCFC-22를 사용한 사이클 효율은 CFC-12를 사용했을 때의 효율과 거의 같다. 그러나 HCFC-22는 CFC-12보다 높은 압력과 온도에서 작동하며, 이를 사용하기 위해서는 장치의 설계 변경이 필요하며, EPS의 열전도도는 CFC 폼의 열전도도보다 높기 때문에 좀더 두꺼운 단열재가 사용되지 않는 한 기기나 건물벽을 통한 열손실이 더 크게 된다.

대체냉매에 따른 최악의 사태는 다음 두가지로 생각할 수 있다. 첫째, 장차 할로젠화 합성물 뿐만 아니라 모든 염소합성 물이 전면 사용금지될 가능성이 높다. 이 경우 HCFC-22는 CFCs 11과 12의 대체냉매로서 사용될 수 없으며, 암모니아나 프로판과 같은 유체의 사용만이 고려될 것이다. 암모니아와 프로판은 가연성, 부식성 등 많은 문제에도 불구하고 훌륭한 열역학적 특성 때문에 냉각제로서 사용될 수 있을 것이다. 둘째, EPS는 제조업자들과 건설업자들이 기존의 화이버글라스 단열재를 선호하는 경우에는 대체 단열재로서의 기능을 상실할지도 모른다.

반면에, CFC 규제에 대한 대응책으로 보다 새롭고 진보된 기술들이 개발되어 장래 에너지 보존에 대한 더 많은 방법들을 제시할 가능성이 있으며, 이들중 가장 유망한 분야는 가전기기, 건물응用に 적용할 수 있는 진공단열기술과 개선된 스티어링(stirling) 흡수 냉동 사이클에

대한 기술개발이다. 그러나 이를 실현하기 위해서는 먼저 주요한 기술적 문제가 해결되어야 한다. 예를 들면, 진공패널의 경우, 보통 가정용 냉장고에 사용되는 폼 단열재와 같이 교체하지 않고 15년 이상의 수명을 보장해야 한다. 현재의 제품들은 폼 단열재가 구조적 강도에 크게 기여하고 있기 때문에 진공을 사용하여 단열하는 경우 냉장고 캐비닛의 구조 설계를 변경하여야 한다. 궁극적으로 이러한 대체냉매 개발에 대한 성공적인 연구 개발 결과들은 더 높은 에너지 효율과 에너지 사용 향상에 큰 영향을 주게 될 것이다.

## 2. 방법론

앞에서의 4가지의 대체냉매들에 대한 에너지 사용량을 냉장고, 차량공조기 또 주거용 건물 등에 대한 전형적인 경우를 설정하여 일일 또는 연간 에너지 사용량에 대하여 조사하였다(전기에너지는 일차 에너지로 변환시켜 계산함). 이렇게 대체 냉매를 사용했을 경우 에너지 사용량과 기존 기기 및 건물의 에너지 사용량을 단위 유니트에 대하여 직접 비교할 수 있다. 그러나 상업용 건물의 단열과 같은 CFC의 응용분야는 정보의 부족으로 어떤 것이 전형적인 유니트인가를 정의하는데 애로가 있었으며, 좀더 포괄적으로 정의할 수 밖에 없었다. 따라서 이 분야의 비교는 정확성이 결여됐으며 그 경향에만 주의할 필요가 있다.

단열의 효과는 CFC 폼이 똑 같은 두께의 대체 재질로 대체되었을 때를 가정함으로써 비교계산한다. 온수기의 피복을 통한 열손실과 냉장고나 냉동기에서의 열 획득은 간단한 UA-ΔT 근사방법을 사용하여 계산할 수 있다. 건물의 부하는 기후변화와 대체단열재의 종류를 감안하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 계산하였다.<sup>4,5)</sup>

냉동 사이클에서 효율의 변화는 두가지 방법중의 하나로 계산되었다. 각각의 경우에서, 이상 사이클의 효율,  $COP_{ideal}$ 은 식(1)과 같이

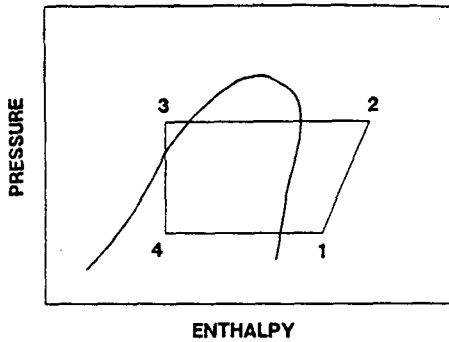


Fig.2 Identification of state points for ideal cycle COP calculations

각 유체에 대한 이상 압축, 팽창, 과정을 가정하여 그림 2에 나타난 점들에 대하여 다음과 같이 계산되었다.

$$COP_{ideal} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1} \dots\dots\dots (1)$$

HFC-134a와 HCFC-123 대체냉매에 대한 열역학적 특성은 기초적인 데이터만 얻을 수 있었으며, 기존의 냉매의 성능과 비교할 때 현재로서는 계산에 의한 “이론적” 효율만이 사용됐으므로, 이를 실제에서 증명해야 하는 문제가 남아 있다. 최근의 실험결과는 압력-엔탈피(P-h) 데이터를 사용하여 HFC-134a에 대한 경우가 효율에 있어서 CFC-12에 비하여 감소되는 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 아직 확실히 규명되지 않고 있으나, HFC-134a의 계산에 의한 이상적 COP 값은 실험치에 비교하여 일반적으로 5% 정도 높은 값을 주고 있는 것으로 나타났다.

냉장고, 냉동기, 진열용기 및 자동판매기 등에 대한 실제적 COP 값은 각 유체에 대한 이상적 COP 값에 식(2)와 같이 모터, 압축기 효율을 각각  $\eta_{mot}$ 와  $\eta_{comp}$ 로 가정하여 계산된다.

$$COP = \eta_{mot} \eta_{comp} COP_{ideal} \dots\dots\dots (2)$$

그리고 냉장고, 냉동기, 자동판매기에 대한 COP값과 열획득량(Heat Gain)은 일일 혹은 연간 에너지 사용을 예측하기 위한 계산식에 사용된다.<sup>6)</sup>

원심식냉동기(centrifugal chiller)와 차량용

공기조화기에 대한 에너지 사용은 기존의 전형적인 에너지 사용량에 대체냉매를 사용할 때의 성능비율을 곱함으로 식(3)과 같이 계산된다

$$Q_{alt} = Q_{CFC} \frac{COP_{CFC}}{COP_{alt}} \dots\dots\dots (3)$$

예를 들면 한 자동차 제조업자가 CFC-12를 사용할 때 차량용 공기조화장치는 운전자가 1년주행(평균 10,000 mile) 동안 20 갤런의 연료를 소비한다고 추정하였을 때, HCFC-22와 CFC-12에 대한 COP 값은 각각 2.25와 2.35이기 때문에 HCFC-22에 대한 연료소모량은 CFC-12에 비하여 4% 더 높을 것이다. 즉 20.8gallons/10,000mils의 연료가 소모된다는 결론이다. 그러나 한가지 간과하지 말것은 HCFC-22를 사용한 공조시스템은 기존의 CFC-12에 비하여 더 높은 작동압력을 요구하므로 중량이 무거워지며, 이를 차량에 장착했을 때 무게에 따른 불리한 조건을 감수해야 한다는 점이다.

### 3. 결 과

앞에서의 해석의 결과는 표 1에 자세히 수록했으며, 대체냉매로 대체했을 경우 미국내에서만 에너지 사용량은 연간  $10^{15}$ -Btus/year(quadrillion)가 증가하게 된다. 또 그림 3은 몇 응용분야의 전체 에너지 사용량에 대한 비교를 보여주고 있다. 알기 쉽게 1quad라는 량의 에너지는 1년동안 1,400만 가정에 난방을 공급하기에 충분한 량이다. 참고로 미국은 1년에 총 75quads의 에너지를 사용하고 있다(공간의 난방, 수송, 생산제조, 조명 등을 포함한 량). 그리고 이중에서도 대체냉매 때문에 가장 큰 영향을 받는 분야는 냉장고, 냉동기 및 건물단열 응용분야이다.

이 분야에서만 국가적으로 총에너지 사용량이 68~75% 증가할 것으로 예상된다. 그림 4는 기존대체 냉매를 사용했을 때 각 분야에서의 에너지 사용량의 전체에 대한 비율을 보여주고 있다. 이중 가장 큰 영향을 받는 것이 가정용 냉장고와 냉동기이다. 만약 CFC-12와 CFC-11를 대체할 수 있는

성능이 좋은 대체냉매가 개발되어질 수 있다면 0.10quads/year, HCFC-22와 EPS로 대체하는 경우 0.52quads/year, 그리고 암모니아와 화이버글라스 단열을 사용하는 경우 0.92 quads/year의 에너지 사용량이 증가할 것이다. 이러한 수치들은 현재의 에너지 사용량보다 6~60%의 증가를 의미한다. 이외의 폼 단열재가 사용되는 분야로서 온수기, 차량공조기, 원심냉동기 등에 대한 연구도 필요하다고 본다.

건물의 단열에 대한 에너지 사용량의 증가는 처음 우려했던 것 보다 훨씬 적은 양일지 모른다. 이는 거주용 건물벽 구조에서 폼 단열재가 전체의 전열저항값인 R-값에 미치는 영향은 부분적이기 때문이다.<sup>7)</sup>

그러나 가정용 가전기기에서는 폼 단열재의 사용이 R값에 주는 영향이 절대적이며 대체 단열재의 사용은 총에너지 사용량을 약 2/3 혹은 그 이상 까지도 증가시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다. 그러므로, 건물 단열의 경우에 비하여(구조특성상 또 제조 생산면에서) 가전기기의 단열은 그 조건이 편이하게 다르지만, 대체 폼 단열재의 개발은 기존CFC 사용자들 모두에게 혜택을 줄 것은 확실하다.

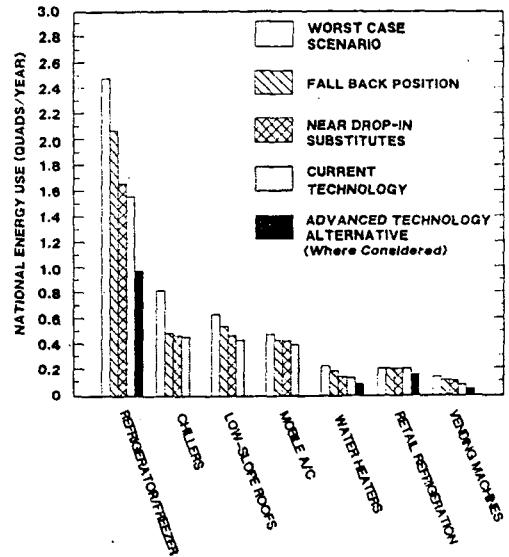


Fig.3 National energy use of alternative technologies for selected applications

장래 HCFCs 대체냉매에 대한 규제가 강화되는 경우, HCFC-22를 주거용, 산업용 공조기기 및 히트 펌프 장비에 대체냉매로 사용하는 경우 에너지 사용효율은 더 나빠질 수밖에 없을 것이다. 그러나 장래에 이 분야에서 연구개발을 통하여 기술이 개발되고, 적용되었을 때, 에너지 효율면에서도 큰 진전이 이

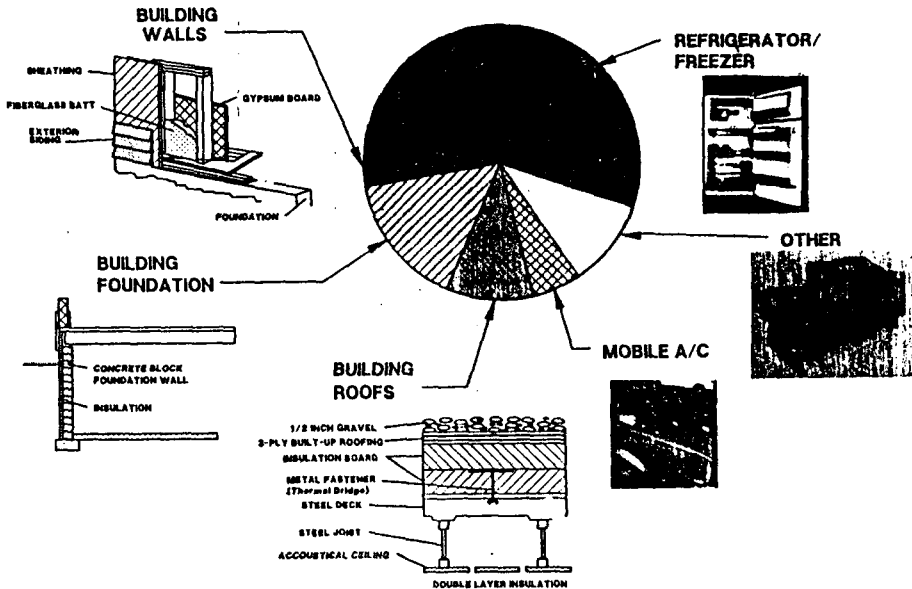


Fig.4 Breakdown of energy impact for the fallback alternatives by application

Table 1. National energy impacts of alternative technologies(quads/year)

Application	Near Drop-In Substitutes	Fallback Position	Worst Case Scenario	Advanced Technology Alternatives
<b>Building Equipment :</b>				
refrigerators & freezers	0.10	0.52	0.92	-0.58
water heaters	0.01	0.04	0.09	-0.06
beverage vending machines	0.01	0.03	0.06	-0.03
retail refrigeration	-0.01	-0.01	0	-0.05
centrifugal chillers	0.01	0.03	0.36	-
Subtotal	0.12	0.61	1.43	-0.72
<b>Building Envelopes :</b>				
residential walls	0.01	0.02	0.05	-0.04
residential foundations	0.00	0.17	0.32	-
commercial walls	0.02	0.04	0.08	-0.08
low slope roofs	0.03	0.11	0.20	-
Subtotal	0.06	0.34	0.65	-0.12
<b>Transportation :</b>				
refrigerated transport	0.00	0.01	0.02	-0.01
mobile A/C	0.03	0.04	0.08	0.02
Subtotal	0.03	0.05	0.10	0.01
<b>Total</b>	<b>0.21</b>	<b>1.00</b>	<b>2.18</b>	<b>-0.83</b>

\* Advanced technologies are not evaluated for these applications.

루어질 것으로 기대한다. 예를 들면, 진공단열 판 방식을 사용함으로써 냉장고, 냉동기 그리고 온수기 등에서 약 0.5quads/year의 에너지를 절약할 수 있을 것이다. 나아가서는 건물이나 냉동 트럭에도 이러한 단열방식을 채택할 때, 에너지 절감효과를 볼 수 있으며, 일반 냉장고, 냉동기 및 상업용 냉동기에 대체 냉매에 효율이 좋은 냉동사이클의 개발도 가능하리라 본다.

#### 4. 결 론

표 1에 수록된 처음 세 칸은 그 에너지 사용량을 고려할 때 장기적으로는 바람직하지 못하다고 판단되며, 이와 같은 단점은 기업체와 정부의 협력을 통하여 대체 냉매와 그 이용기술에 대한 연구, 개발로서 충분히 극복할 수 있는 문제라고 생각한다.

대체냉매 생산회사들은 HFC-134a, HCFC-123과 HCFC-141b와 같은 새로운 화학합성 물질을 개발할 충분한 연구능력이 이미 있으며, 개발에 따른 환수 이득 또한 기대할 수 있다. 다만, 이러한 노력은 대학, 정부 및 연구소들이 산업체의 CFC 최종사용자들과 긴밀한 협조하에 기술개발과 정보교환을 통하여 이루어져야 한다고 믿고 있다. 이와 더불어 예상치 않았던 문제점들, 즉 냉매의 독성이나 가연성과 같은 분야에 대한 장기적인 연구가 병행되어야 할 것이다. 새로운 대체냉매에 대한 개발이 계속 추진되어야 할 것이며 궁극적으로 비 CFC 기술의 첨단화가 정착되어야 할 것이다.

미에너지성(DOE)은 현재 대학과 연구소, 화학회사와 최종 사용자들간의 협동연구를 추진하고 있으며, 각각의 그룹들이 어떤 분야를 맡아 개발할 것인가 하는 역할을 정의하고 지

원해주고 있다. 잘 계획되고 조직화된 연구개발 프로그램은 산업체로부터도 많은 지원을 받을 수 있을 뿐 아니라, 오존층 파괴를 막기 위한 CFC의 사용금지가 몰고 온 문제를 기술적으로 극복함으로써 경제적, 사회적 충격을 최소화 하고 나아가서 새로운 기술의 시대를 여는데 크게 기여하게 될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. J.K. Hammett et al., "Product Uses and Market Trends for Potential Ozone-Depleting Substances, 1985-2000," Rand Corp Report R-3386-EPA, May 1986.
2. T.S. Statt, "The Use of Chlorofluorocarbons in Refrigeration, Insulation, and Mobile Air Conditioning in the United States," EPA Conference on Substitutes and Alternatives to CFCs and Halons, Washington DC, January 13-15, 1988.
3. S.K. Fischer, F.A. Creswick, and J. Dieckmann, "Energy-Use Impact of Chlorofluorocarbon Alternatives."
4. S.R. Petersen and A.H. Fanney, "Technical and Economic Analysis of CFC-Blown Insulations and Substitutes for Residential and Commercial Construction," National Bureau of Standards Report, September 16, 1987.
5. T.C. Chang and H.W. Busching, "Energy Savings Potential of Roofing Research," ORNL/Sub/82-22293/1, December 1983.
6. W.D. Lee, "Development of a High Efficiency. Automatic Defrosting Refrigerator/Freezer: Phase I—Design and Development. Final Report Volume II—R&D Task Report" ORNL/Sub-7255/2, February 1980.
7. J.E. Christian, "Impact of CFC Restrictions on U.S. Building Foundation Thermal Performance," ORNL/CON 245, December 1987.