

## Non CO<sub>2</sub> 온실가스 처리기술에 관한 연구 동향 Review of Studies on Treatment Technology for Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases

장태현<sup>1\*</sup>, 길상철<sup>2</sup>, 나도백<sup>2</sup>, 김상우<sup>2</sup>  
Tae-Hyun Chang<sup>1\*</sup>, Sang-Cheol Kil<sup>2</sup>, Do-Baek Nah<sup>2</sup> and Sang-Woo Kim<sup>2</sup>

### <Abstract>

A methodology is described to assess the potential long term contribution of Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases. Many studies aimed at minimizing the charge in a refrigerating machine were thus developed. On a global level, reduction of refrigerant charges must not effect energy aspects while respecting environmental constrains[Montreal 1987, Koto 1997]. In this paper, recent studies on non CO<sub>2</sub> are reviewed since it is one of the key technologies. Hydrocarbons are one of the candidates for refrigerants of next generation.

*Keywords : Non-CO<sub>2</sub>, Greenhouse gas, Hydrocarbon*

### 1. 서 론

온실효과는 대기 중의 이산화탄소가 층을 이루고 지구를 둘러싸면서 지구 내부의 열발산을 차단해서 지구내의 온도가 상승하는 것을 말한다. 태양에서 방출된 빛에너지는 지구의 대기층을 통과하면서, 일부는 대기에 반사되어 외계로 방출되거나, 대기에 직접 흡수된다. 그리하여 약 50% 정도의 햇빛만이 지표에 도달하게 되는데, 이때 지표에 의해 흡수된 빛에너지는 열에너지나 파장이 긴 적외선으로 바뀌어 다시 바깥으로 방출하게 된다. 이 방출되는 적외선은 반 정도는 대기를 뚫고 외계로 빠져나가지만, 나머지는 구름이나 수증기, 이산화탄소 같은 온실효과 기체에 의해 흡수되어 바깥으로 방출하게 된다.

1974년 California 대학의 Rowland 등에 의해 서 freon 냉매의 Ozone 층 파괴가 제기된 후, CFC(Chlorofluorocarbon) 냉매의 사용이 규제되었고, R-22 역시 2020년이 사용 기한으로 설정된 물질이므로 이들 냉매의 대체냉매의 개발이 시급한 문제이다. 이 분야 논문들에서 탄화수소 냉매를 그 열 물리학적 성질과 응축기와 증발기 내에서 열전달에 대해 광범위하게 다루고 있고, 각 탄화수소 냉매의 열전달 계수와 성능 계수(COP)를 R-22와 비교 하고 있다. 특히 탄화수소의 연소성과 폭발성을 줄이기 위한 각 냉매의 성분과 공불 냉매를 다루고 있다.

이러한 온실효과의 주범이 되는 것으로는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 프레온(염화불화탄소) 수소불화탄소 그리고 6불화황(SF<sub>6</sub>) 등이 있다. 수증기와 오존도 이에 속하나 다른 기체들에 비해서는 영향이 적다고 할 수 있다. 이들 온

<sup>1</sup>교신저자, 정회원, 전문연구위원, RESEAT, 한국과학기술정보연구원, E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

<sup>2</sup>정회원, 책임연구위원, 정보분석실 한국과학기술정보연구원

<sup>1</sup>Korea Institute of Science and Information, RESEAT Senior Research Fellow

<sup>2</sup>Korea Institute of Science and Information, Information Analysis Center, Pricipal Researcher

실가스로 인해 발생하는 영향으로는 동식물의 피해와 농작물의 수확감소 그리고 산업 경제적 손실 등을 들 수 있다.

최근에 기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC)를 비롯한 과학자그룹은 '기후변화'를 21세기 인류가 직면한 최대의 과제로 규정했다. 또 기후변화로 인해 전 세계가 환경, 경제, 사회적으로 심대한 타격을 입게 될 것이라고 경고해왔다. IPCC는 전 세계적으로 2050년까지 산업화 이전에 비해 기온상승을 2℃ 이하로 억제하고, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도를 450ppm으로 제어하지 않으면, 향후 큰 어려움을 겪을 것이라는 보고서를 발표했다.

우리나라는 온실가스 배출량 세계 9위, 누적 배출량 세계 22위, 온실가스 배출증가율 OECD 국가 1위로, 세계에서도 손꼽히는 온실가스 다배출국가로 분류돼 있다. 본 연구에서는 온실효과와 주성분인 CO<sub>2</sub> 외에 CFC 냉매, 탄화수소 냉매, 메탄, 아산화질소 그리고 SF<sub>6</sub> 등의 Non-CO<sub>2</sub> 가스의 처리에 관한 연구동향을 고찰하여 이 분야의 기술과 연구 증진에 기여하고자 한다.

## 2. Non CO<sub>2</sub> 온실가스

### 2.1 염화불화탄소

#### 2.1.1 국내의 연구 동향

온난화 기여도가 상대적으로 낮은 비이산화탄소(Non-CO<sub>2</sub>) 분야는 대체물질개발과 배출량 저감 공정 개발 등을 중심으로 연구개발을 추진하였으며 대체물질 개발로는 불화탄소(HFCs, PFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>) 배출 저감 공정 개발 그리고 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O) 또한 정부는 2015년까지 온실가스처리 기술의 경제성 확보를 목표로 연구개발 예산을 지속적으로 확대 투자하며 단계별중점 개발 분야를 선정하여 예산 투자의 효율성도 강화해 나갈 계획이다. 이 분야의 국내 연구 동향은 김명수(2007)의 “지구 대기 감시관측소 운영”, 이영하(2008)의 “친환경 세정 및 제조 토너카트리지 기술지원 사업”, 송중섭(2002)의 “한-러 공동연구” 등이 있다. 대체냉매에 대한 연구로는 이성재(2002)의 “열부하제어용 모듈형 캐비닛 쿨러 개발”, 송성호(2002)의 연구는 “냉매 R410A를 이용한 독립운

전식 친환경 고효율 운송 냉장 시스템 개발” 그리고 정동수(2003)는 HCFC-22를 사용하여 “마이크로 핀이 달린 알루미늄 평판 관에서 HCFC-22 대체 냉매의 응축열전달 특성 규명” 등으로 연구되고 있다.

#### 2.1.2 외국의 연구 동향

지구온난화를 해결하기 위한 방안으로 근본적으로 화석연료의 사용을 대체할 수 있는 새로운 연료의 개발을 들 수 있으나 그 이전 단계로 이산화탄소 배출 억제와 제거기술을 들 수 있다. 이와 더불어 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC 그리고 O<sub>3</sub>과 같은 다른 오염물질이 중요하다. 최근의 연구에 따르면 앞으로 이산화탄소보다 이러한 온실가스에 의한 기여율이 더 높아질 수 있기 때문이다.

성층권의 오존층을 보호하기 위하여, 염화불화탄소(CFC)들의 사용이 단계적으로 정지되었다. R-22와 같은 수소화염화불화탄소(HCFCs)는 또한 오존층 파괴를 야기하여 이 냉매들은 제한 중에 있고, 미래에 단계적으로 폐지될 것이다. 암모니아 그리고 탄화수소(HCs) 같은 자연 냉매들은 이 문제를 해결하는 하나의 방법이다.

CFCs로부터 HCFCs로 전환되었음에도 온존층 파괴가 없는 HCFC에 대한 두 번째 단계에서 자연냉매로 이동하는 움직임이 일어났다. 즉, 환경에서 자연적으로 발생하는 물질의 사용이다. 그 물질은 암모니아, 이산화탄소, 탄화수소, 그리고 물이나 공기 등이다. 기존 냉매 중에서 암모니아(R-717)는 증발잠열이 가장 크고, 오존파괴지수와 지구온난화 지수가 영이다. 그러나 이 냉매는 독성이 있고, 가연성이며, 공기와 혼합가스에 인화하면 체적비 13%~27%에서 폭발하는 결점이다. 이 문제는 제한된 주입 시스템을 유발하는 혁신적인 열교환기의 설계를 소개해 건의되었다. 예로서, Ayub(2008)는 하나의 만액 다관형 증발기에 대한 신기한 설계를 소개하고 있다.

## 2.2 탄화수소

### 2.2.1 탄화수소 냉매

연구 과제를 통한 이 분야의 국내 연구로는 윤영기(2008)의 “고분자 전해질 연료전지 핵심

원천기술 및 응용기술 개발”, 한인근(2002)의 “탄화수소계 냉매를 적용한 고효율 열펌프 시스템 개발” 그리고 전기원(2008)의 “대체 기초유분 제조기술 개발” 등이 있다.

메탄에 대한 연구로는 길상인(2008)은 “고효율 저공해 환경에너지 기계기술 개발”, 윤왕래(2008)의 “천연가스로부터 수송용 오일 생산 핵심 기술 개발” 그리고 조순행(2008)의 “에너지 한계 극복 기술개발” 등이 연구 되었다. 조경숙(2008)의 연구에서는 개발하고자 하는 메탄 및 악취 동시 저감 기술은 기후변화대응기술임과 동시에 환경질을 개선할 수 있는 원천기술로 지적되고 있다.

이와는 대조적으로 외국의 경우로 Bjorn Palm(2008)의 연구에서 프로판이나 이소부탄과 같은 탄화수소들은 1920년 말경 냉매로 사용되었다. 이들은 아황산가스나 암모니아 같이 자극성 냄새는 없지만, 가연성을 갖고 있다. 대체물을 찾은 후, CFC 냉매는 1930년 Thomas Midgley에 의해서 출현되었고, 65년 뒤에 세계는 Rowland와 Molina의 경보를 수용하여 CFCs는 많은 나라에서 사라졌다.

논문들에서 자주 사용되는 탄화수소 냉매의 상태량들이 논의 되었고, R-22, R134a 그리고 암모니아와 비교하였다. 논문들에서 탄화수소 냉매의 성분들의 유용성이 논의 되었고, 탄화수소와 함께 공업적 시스템을 제시하였다. 이들 시스템의 어떤 것에 대하여 안전 논쟁에 대한 설계와 해결 방법을 제공한다. 프로판 그리고 이소부탄들은 1930년 까지 사용되었다.

지난 15년 동안, 몇 개의 탄화수소들과 탄화수소 혼합물은 냉매로써 상업적으로 사용되었고, 이소부탄(R600a)은 자주 탄화수소 냉매로 이용되었다. 프로판(R290)과 프로필렌(R1270)은 열펌프 제작회사에서 공기조화기와 상업용 냉장고에 사용되었다. 영국 회사 Calor Gas의 냉동사업 CARE Refrigerants는 냉매로써 탄화수소의 정보를 제공하였다.

펜탄과 이소부탄은 R11대신에 원심형 압축기 시스템에서 사용이 고려되었고, 프로판, 프로필렌 그리고 R-22와 비교하였다. HCs의 증기 밀도는 R-22의 약 절반이다. HCs의 액의 밀도가 R134a, 그리고 R-22보다 반 이하로 작다. 그러나 HCs의 증발열은 H(C)FCs의 약 두 배이다.

암모니아는 극도로 높은 증발 잠열을 가지고 있지만 상당히 낮은 비등점에서 아주 낮은 증기 밀도를 갖는다. 3중점 온도와 임계온도를 보면 이들 유체들 사이의 명백한 차이가 있다. 그룹들에서 주요한 차이는 분자량에 있고 밀도와 증발량 차이를 야기시킨다.

Masaru Ichikawa(2007)은 석유에 대신한 차세대 가스탄소 자원으로서 탄층메탄(CBM, coal bed methane) 용광로 코크스가스, 유기자원인 재순환 바이오가스 등의 주성분인 메탄을 이용하는 천연가스 화학 산업이 기대되며, 특히 최근 연구개발이 추진되고 있는 메탄에서 직접 벤젠과 수소를 동시에 생산하는 MTB(methane to Benzene) 촉매기술이 석유·가스 업계와 석유화학 기업의 관심을 끌고 있다.

메탄의 탈수소 방향족화 반응에서는 6개분자의 메탄으로부터 1개 분자의 벤젠과 9개 분자의 수소가 CO<sub>2</sub>의 배출 없이 동시에 생산되는 것이다. 즉 6CH<sub>4</sub>=C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>+9H<sub>2</sub>이다. 여기서 메탄으로부터 벤젠을 직접 합성하는 촉매기술을 MTB 기술이라고 한다.

DMFC(direct method fuel cell)에서 가장 큰 기술적 문제인 크로스오버는 음극 및 양극 배출구에서 모아진 건조 BaCO<sub>3</sub> 침전물의 합계로부터 계산되든가, 고분자 전해질 막을 통한 CO<sub>2</sub> 투과에 의해 발생하는 메탄올 크로스오버 측정의 일반적인 방법으로도 측정된다. DMFC의 에너지 밀도는 셀 방전 수행성에 의존적일 뿐만 아니라 메탄올 크로스오버와 직접적으로 연관된 패러딕(faradic) 효율성에 상당히 영향을 받는다는 보고가 있다. 최적화된 조업조건 아래에서, 60도 및 1.0M 메탄올을 이용하는 DMFC는 순수한 에탄올에 바탕을 둔 1,800Wh/kg의 에너지밀도를 갖는다고 보고되고 있다.

수소를 생산하기 위하여 사용되는 주요산업공정이 수증기 메탄 개질(SMR)공정이다. 비록 SMR공정이 많은 세월동안 이용되었어도 아직도 개선할 분야가 많이 있다. 특히 단일 유닛에서 적어도 2개 이상의 공정기능을 효율적으로 결합하는 반응로 개념을 개발하는 것이 산업에서나 학술적으로 대단한 주목할 만한 목표이다.

### 2.2.2 탄화수소 냉매의 상태량

Akio Miyara(2008)는 냉매들은 세계적인 환경문제를 때문에, 큰 변화들을 당한다는 것을 지적하였다. 성층권의 오존층을 보호하기 위하여, R-12와 같은, 염화불화탄소(CFC)들은 단계적으로사용을 정지하였고, R-22와 같은 수소화 염화불화탄소(hydrochlorofluorocarbon, HCFCs)는 또한 오존층 상실을 야기시키고, 그 냉매들은 제한 과정 중에 있고, 미래에 단계적으로 폐지할 것이다. 오존층의 보호는 수소화염화불화탄소의 출현으로 일시적인 해결하였다. 그러나 총체적인 온난화는 장기간의 HCFCs 사용을 수용하지 않았다. 냉동, 공기조화, 그리고 열펌프 분야에서, 연구원들이나 개발자들은 다음세대 냉매를 찾도록 강요되었다. 그 냉매는 오존층을 감소시키는 가능성이 없고, 낮은 지구 온난화의 잠재력, 짧은 대기 수명 그리고 높은 효율을 가져야 한다. 이산화탄소, 암모니아, 그리고 탄화수소(HCs) 같은 자연 냉매들은 그 문제를 해결하는 하나의 방법이다. 다음 세대의 냉매들의 연구를 위하여, 많은 순수물질을 분류하고 그리고 이성분 공비혼합물(azeotropic binary mixture)의 예측이 수행되고 그리고 중국에서 자연냉매의 전망이 보고되었다.

Fig. 1(a)는 2상 혼합물의 응축모델과 그림 1(b)은 모델의 상평형도를 보여준다. 이 모델로부터, 경계에서 상평형, 포화된 증기용적, 그리고 과냉액 용적 등이 가정된다. 응축과정은 열과 질량 평형 식들을 풀어서 시뮬레이션될 수 있다. 응축 막의 열전달계수는 순수 냉매에 대한 상관관계로 부터 계산되었다. 경계에 대한 증기용적으로부터 질량전달은 Chilton-Colburn 아날로지를 기초로 부터 계산된다.

### 3. R410A 및 오일 혼합물

Guoliang Ding(2009) 등의 논문에서 근공비(near azeotropic) 혼합냉매 R410A는 동작물질로서 공기조화시스템의 R-22에 대한 주요 대체냉매 중 하나로 고려된다. Fig. 2와 같이 직경 5mm 내부 나선 홈 마이크로 핀 튜브 내의 R410A-오일혼합물 유동비등의 압력 강하 거동은 R410A 공기조화시스템에 대한 마이크로 핀 튜브를 갖는 열교환기 설계에서 필요하다. 이 연구의 목적은 직경 5mm의 내부 나선 홈 마이크로 핀 튜브 내서, R410A-오일혼합물 유동비등에 대한 마찰압력 강하의 실험 데이터를 얻고 이 데이터로부터 압력 강하 상관식을 검증함으로써 최종적으로 R410A-오일혼합물 유동비등의 마찰압력 강하 예측을 위한 보다 좋은 상관식을 제공하는 것이다.

순수한 R410A와 R410A-오일혼합물에 대하여 계측은 R410A의 마찰압력 저하가 초기에는 증기의 건도와 함께 증가하고 그리고 감소하였다. 증기건도 범위 0.7과 0.8사이에서 국소 최대치를 제공함으로 R410A-오일혼합물의 마찰압력 저하는 질량 플러스와 함께 증가하였다. 오일의 존재는 2상 마찰압력을 강화하였고 그 마찰압력에 대한 오일의 영향은 국소 오일농도가 높은 곳에서 높은 증기건도에서 더욱 명백하다. 그 강화된 요소는 항상 1보다 크고 주어진 건도에서 정상의 오일 농도와 함께 증가하였다.

R410A-오일혼합물의 마찰압력 저하에 대한 새로운 증기상승수 상관식이 냉매-오일혼합물의 국소 상태량들을 근거로 내부적으로 나선 홈이 파진 마이크로 핀 튜브 내에서

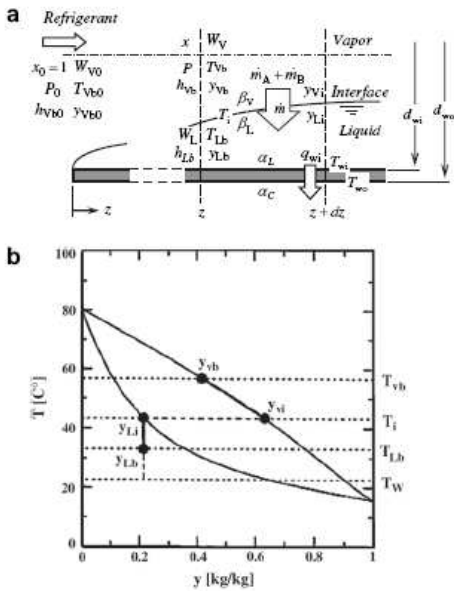


Fig. 1. The physical model of two phase mixture (Koyama et al, 2001, 1998) (a) condensing process and (b) phase equilibrium.

R410A-오일혼합물의 유동비등에 대해 개발되었다. 그것은 실험데이터와 95%로 부합되고 편차는  $\pm 20\%$ 이었다. 평균 및 최대 편차는 7.3% 그리고 28%이었다.

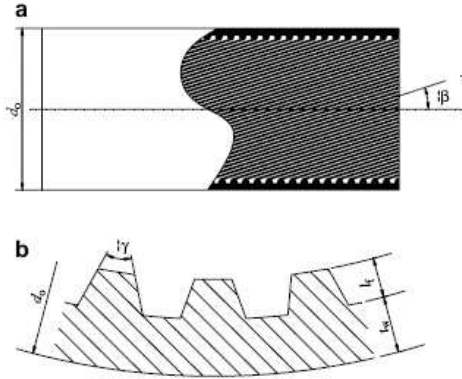


Fig. 2. Sectional diagram of the tube with the internal spiral groove, a) cross sectional view (b) cross sectional drawing.

국소 마찰압력 저하는 5mm 직경의 내부적으로 나선 홈이 파진 마이크로 핀 튜브에서 순수 R410A와 R410A-오일 혼합물에 대하여 계측되었다. 그 테스트 결과는 순수 R410A의 마찰압력저하가 초기에는 증기의 건조도와 함께 증가하고 그리고 감소하였다. 그 강화된 요소의 범위는 현재의 시험 조건에서 약 1.0~2.2이다.

R410A-오일 혼합물의 실험 데이터에 대한 마이크로 튜브에서 냉매-오일의 최신의 압력저하 상관식의 예측가능성이 연구되었고, 그 결과는 그들 중의 어느 것도 R410A-오일 혼합물의 실험데이터를 만족하게 예측할 수 없었다. 그리고 혼합물 상태량에 대한 오일의 영향을 고려하한 그들 상관식은 다른 상관식보다 실험데이터에 대하여 나은 예측을 제공하였다. 마찰압력저하에 대한 새로운 증기상 승수상관식이 냉매-오일 혼합물의 국소 상태량들을 근거로 내부적으로 나선 홈이 파진 마이크로 핀 튜브 내에서 R410A-오일 혼합물의 유동비등에 대해 개발되었다.

#### 4. 탄화수소 냉매의 연소와 시스템

탄화수소들은 모두가 높은 연소성을 가지고 있다. 연소성의 한계는 공기 중에서 냉매의 약

2%부터 9% 혹은 10%이다. 자동점화 온도는 460°C 부근이고 연소에너지는 대략 50,000kJ/kg 이고, 연소속도는 약 0.4m/s 그리고 최소 점화 에너지는 약 0.25mJ이다. 시스템에서, 냉매 량의 감소는 위험성을 줄이기 위하여 매우 중요하다. 이 방법들은 간접적인 시스템의 사용, 조밀한 열교환기 그리고 조밀한 설계에 의해서, 시스템에 주입을 줄이는 몇 가지 시도가 있었다. Fernando 등은 단지 하나의 가열 설계, 200g 이하를 사용하는 5kW 가열 용량의 물과 물을 사용하는 열펌프를 보고하였다.

HFC 시스템에 사용된 재료들은 탄화수소에 대하여도 사용되었다. 연소성의 이유 때문에 유럽 압력장치 연합의 지시는 탄화수소에 사용되는 압축기에 대하여 부가적인 보정과 승인을 요구했다. 이 유로 유용한 큰 용량의 밀폐형 압축기의 수는 아주 제한되어있다. 압축기들은 1,600W까지 작은 것이나 혹은 큰 용량(반 밀폐형, 왕복동, 원심형 압축기)이 분명하고, 중간 크기의 밀폐왕복동형, 스크롤 형, 로터리 형은 설명이 부족하다. 큰 산업적 시스템에서 스크류 압축기는 탄화수소를 사용하여왔다. 아래와 같이 각 제작회사들의 제품과 냉매 주입량을 소개한다.

#### 4.1 탄화수소 냉매의 시스템

이탈리안 제작회사 De' Longhi는 냉매로서 프로판을 사용하여, 작은 공조기 시스템을 제작하였다. 냉각 용량 범위는 500에서 3,200W이고, 냉매 주입량은 100 ~ 200g이다. 제품들에서 그들은 광물성 오일을 사용하는 Rechi 로터리 압축기를 사용하였다. 안전한 운전을 보증하기 위하여 봉합된 릴레이 및 열방지기 그리고 여분의 저전압 제어장치 등을 가지고 시스템들은 냉매의 최소량주입에 적합하게 설계되었다.

#### 4.2 오스트리아의 열펌프제작회사 Neura

망속에 묻혀진 동 튜브에서 프로판의 직접적인 시스템을 가졌고, 이것은 주입량을 증가시켰다. 건물에 대하여 부착된 열펌프의 절연된 물 순환을 가진 전체 유닛을 외부에 설치되었다. 직접 팽창에 대한 이유는 오스트리아에서 지중 컬렉터에서 부동액의 사용에 관한 엄격한 규제에 관련된 것이다.

### 4.3 독일의 Dimpany 회사

20년 이상을 프로판을 사용하는 열펌프를 제작하였다. 그 시스템은 외부에 배치되고 외부 공기를 열원으로 사용하였다. 그 용량은 약 19kW까지 상승하였고 프로판의 주입량은 1 ~ 25kg이다. Maneurop로부터 피스톤식 압축기가 사용되었다. 영국의 열펌프 제작회사, Kensa는 외부에 설치하는 물대 물을 사용하는 열펌프를 개발하였고, 그것은 약 10kW의 용량에서 약 600g의 프로판을 사용한다.

### 4.4 스웨덴의 Nibe 회사

프로판 300 ~ 490g를 사용하는 공기 열펌프를 제작하였다. 그 시스템이 공기 도관에서 환기와 함께 있다. 냉매누설의 위험은 내부 튜브의 땀을 제거하거나 혹은 어떤 경우에 증발기에서 이중 급속 층을 사용해 줄었다. 이들 시스템에서 주입이 보통 30g~50g이기 때문에 외부로의 누설은 위험할 만큼 중대하지 않다.

### 5. 아산화질소(NO<sub>2</sub>)

국내의 연구로는 정상권(2007)의 연구에서 펄스튜브 내부의 손실을 정량화하여 최적설계기법에 적용하기 위한 사전단계로 왕복유동하는 작동유체의 실시간의 유량 및 온도, 압력 측정장치를 펄스 튜브 냉동장치에 적용하고 있다. 농촌진흥청(2009)이 제의한 연구과제에서 “질소 사용 수준별 아산화질소 배출 계수 개발” 등이 연구되고 있다.

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 그리고 N<sub>2</sub>O(아산화질소)와 같은 온실가스로 분류되는 화학물질의 농도증가는 지구기온을 변화(지구온난화를 지칭함)시키고 있으며 N<sub>2</sub>O 농도의 변화를 보면 1750년 이후 16%가 증가하여 N<sub>2</sub>O의 대기 중 농도는 314ppb(1998년 자료)로 CO<sub>2</sub> 농도 365ppb보다는 낮지만 GWP(Global Warming Potential)는 100년간을 두고 볼 때 296배나 크며 최근의 총 지구온난화 영향력은 약 6%를 차지하고 있고 이중 약 16%가 농업분야로부터의 영향에 기인하는 것으로 추정되며 또한 농업분야 영향중 80%가 호주의 농토에서 배출되는 것으로 보여지며 그 세부적인 구성은 질소비료사용(32%), 토양의 황폐화 진행(38%), 동물의 배설물(30%) 등이고 기

타 초지와 산림의 화재도 영향을 주고 있다.

WFPS(Water-Filled Pore Space, 물로 채워진 상태 하에서의 통기성면적) 40% 이하에서는 질화반응에 의한 N<sub>2</sub>O 생성율은 아주 낮으나 WFPS 55~65%에서는 N<sub>2</sub>O 발생이 급격히 증가하고 WFPS 60~70%에서는 산소확산을 제한하고 탈질반응을 촉진하여 N<sub>2</sub>O나 N<sub>2</sub>의 발생이 일어나고 WFPS 80~90%에서는 가스 상의 N<sub>2</sub> 발생이 지배적으로 일어나 결과적으로 N<sub>2</sub>O/N<sub>2</sub> 비는 WFPS 75%이상에서는 감소하게 된다. 따라서 호주에서는 토양이 물에 잠겨있지 않는 한 건기보다는 우기에 N<sub>2</sub>O의 발생이 높게 되는 것이다.

N<sub>2</sub>O의 오존층에 대한 전반적인 영향은 복잡적이고, 1987년 9월 Montreal 의정서에서 다루진 물질들(CFC, 할론, 사염화탄소, 메틸 클로로포름)과는 매우 다르다. 화학반응에 관한 수많은 불확실성이 존재한다. 이 경우에 N<sub>2</sub>O의 오존층에 대한 부정적 효과에 대해서는 의심할 바 없으나, 그것의 오존 감소 가능성의 양적 기체에 대한 일치가 없다. N<sub>2</sub>O는 또한 대기 중의 적외선을 강력하게 흡수함으로써 발생하는 현상인 온실효과에 기여한다. N<sub>2</sub>O가 지구 온난화의 주요 기여자가 아님에도 불구하고, 사람이 발생시키는 가장 일반적인 두 가지 온실가스인 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 보다도 더 유력하다. 대략적으로 대기 중에서 150년의 수명을 지님으로 인해, N<sub>2</sub>O는 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 각각 310배와 21배의 지구온난화지수(Global Warming Potential)를 가진다.

### 6. 6불화황(SF<sub>6</sub>)

김대성(2007)의 연구에서 반도체 제조공정의 핵심인 에칭(etching) 공정과 CVD의 드라이 클리닝(dry cleaning) 과정에서 사용되는 perfluorocarbon(PFC)은 반도체 제조에는 없어서는 안 될 필수적인 가스이며, 반도체 생산라인과 함께 그 사용량도 함께 증가하고 있다. PFC는 화학적으로 매우 안정하고 거의 독성이 없는 물질이지만 지구 온난화지수는 CO<sub>2</sub>보다 6000~25000 배가 높은 온실가스로 알려져 있는 가스로서 대기 중에서 10000~50,000년 동안 체류하면서 지표면의 온도를 상승시킬 수 있다. 또한, PFC 중의 SF<sub>6</sub>은 322kJ/mol의 안정한 결합에너

지를 지니고 있는 안정함 무극성 분자 화합물로서 분해처리가 매우 어렵고 실제로 공정에서 사용되는 사용효율이 15% 정도임을 감안 할 때 나머지 SF6는 그대로 대기 중에 방출하고 있는 실정이다.

PFC는 국제적으로 교토의정서에 의거하여 2010년까지 PFC의 사용규제 계획이 수립되었고 이에 따른 PFC의 배출을 줄이거나 대체 물질 개발에 연구가 동반되고 있으나, 배기처리시 비용상승 및 처리의 어려움으로 주로 그대로 방출되고 있는 경우가 높음을 지적하였다. 최승길(2007)은 현재 가장 많이 사용되고 있는 SF6 개폐기를 “SF6 free 친환경 폴리머 개폐기의 개발”을 수행하고자하였고, 김양도(2007)은 “SF6 분리 및 회수를 위한 Gas to Solid 기술 핵심기초연구”를 수행하였다.

Wen-Tien Tsai(2007)의 연구에서 SF6은 무수불산(HF)의 전기분해로 얻어지는 불소가스와 유허과의 반응으로 얻어지는 무색, 무취, 무독, 불연성 그리고 화학안정성이 높은 화합물이며, 또한 전기적으로도 안정된 화합물로서 고전압 하에서 절연내력, 아크에 대한 소호성이 우수하여 아크 하에서 순간적으로 해리 또는 전리되어도 아크가 소멸된 이후에는 다시 안정된 SF6로 돌아오는 특징이 있다. 우수한 화학안정성과 탁월한 전기적 특성을 살려서 전기관계 기기의 절연체재료로 다수 이용되고 있으며 이를 대체할 수 있는 재료는 아직은 발견되지 않고 있음을 지적하였다.

SF6 같은 과불화탄소(perfluorocarbon)는 화학적으로 안정되고 반응성이 적다. SF6은 비극성이며 물에 불용성이지만, 대기 중으로 방출된 후에 이 화합물은 극한 조건에서 산화성 분자(예, H2O)와 반응하여 여러 분해물을 생성한다. 분해생성물 중 SF4와 S2F10은 직업성 노출 한계가 설정되어 있을 정도로 다른 분해물 보다 비교적 독성이 크다. SF6의 분해생성물 중 확인 된 것에는 S2OF10, CF4, COF2, F2, HF, H2S, NF3, F2O, SiF4, S2F10, SF4, SO2F2, S2O2F10 등이 있으며, SF6과 NF3를 제외하고는, 이들 분해물의 가스나 증기는 호흡기, 피부, 눈 등에 자극성을 피부나 눈 등에 접촉되면 큰 화상을 일으킬 수 있다.

SF6는 일반적으로 불활성가스이지만 다른

분자 존재 하에 열이나 전기로 분해한 SF6 분해물은 거의 모두 독성이 있으며 부식성이 있다. SF6와 SF6 분해물의 특성들 중 일부는 지구온난화와 같은 환경위험이 있고 분해제품에 노출 시에는 부작용이 있으므로 습식/건식 등의 회수방법을 사용하여 관리할 것을 권장하고 있다. SF6는 비교적 낮은 독성과 화학안정성으로 일련의 환경규제로부터 면제되었지만 퍼플루오로화합물(perfluorocompound)은 지구온난화 등의 일부 환경위험이 있고 그 분해제품에 노출 시에는 부작용이 있으므로 습식/건식 등의 회수방법을 사용하여 통제해야한다.

## 7. 기타 처리 기술

### 7.1 냉동 시스템에서 냉매의 주입과 주입량 감소를 위한 방법

Montreal 의정서(1987)가 몇 개의 냉매는 오존층을 파괴한다는 것을 강조한 후, Kyoto 의정서(1997)는 냉매의 대부분이 상당한 온실 효과를 제공한다는 것을 지적하였다. 다른 연구들은 냉매의 주입량이 중요하지 않다는 것을 다루었다. F. Poggi 등(2008)은 냉동 시스템의 냉매 주입은 구성하고 있는 장비, 관들, 열교환기들, 압축기, 냉매액 수액기 그리고 여러 가지 부품들에 의존된다. 그 외의 것은 냉매의 특성, 냉매의 물리학적 상태 그리고 시스템의 운전 정도에 관계되고 세 개의 경우들을 다음과 같이 분류되었다. 액이나 증기의 단일 상에서 냉매를 포함하는 부품들, 대부분의 관들, 압축기 그리고 필터들이다. 수액 기에서 두 개의 분리된 상태 하에서 냉매를 포함하는 부품들, 2상 냉매를 포함하는 부품들, 즉 열교환기들이다.

### 7.2 냉매의 충전량 계산

2상 유동 부품들에서 충전 량에 대하여 기공률의 지식은 냉매의 충전을 평가하는데 필요하다. 그것은 2상 유체에서, 가스의 평균 체적률(volumetric fraction)이다. 기공률은 증기의 질에 연관되고 가스 형태로 있는 총 질량유량의 비율이다.

#### (1) 기공률의 상관식들

기공률의 기준은 동차모델 혹은 슬립 율(slip

ratio), 질량 플럭스와 Martinelli 변수와 같은 변수에 의존하였다. Reynolds 수와 같은 무차원 수에 의해서 유동 특성을 고려하기 때문이다.

## (2) Hungmark 상관식

이 상관식은 어떤 압력이나 유동 모델에 대하여 수평과 수직 유동에 적용할 수 있다. 그것은 증기의 질, 밀도 그리고 각 상의 점성, 질량 플럭스 그리고 튜브 기하 형상에 의존된다.

## (3) 작은 채널에서 기공률

기공률의 모델링은 유동 형태를 기초로 해야 하고 기공률과 결합한 적은 수의 연구들과 작은 채널에서 유동 형태의 기시화는 존재한다. 응축기와 증발기에서 총체적 냉매 충전량에 대한 상관식의 이용: 여러 가지 튜브형의 열교환기를 모델링에서 얻은 결과의 정도는 평균 기공률의 약 20%이었다. Hungmark 상관식은 충전량 계측에 대한 실험적 결과에서 10%의 벗어나는 좋은 결과를 얻었다. Froude 수는 Weber 수로 바꾸어 표면 인장력을 고려하였다.

## (4) 시스템의 다른 부품들에서 냉매 충전량-압축기에서 냉매 충전량

압축기에서 윤활유에 용해된 냉매량은 고려되어야 한다. 냉매의 충전량에 대한 이 기여는 중요하고 냉매의 형태(용해와 비 용해)와 시스템의 형태(만액 증발기와 직접 팽창)에 의존된다. 작동온도에서 오일과 냉매 사이의 용해선도를 사용하여 압축기의 오일 양으로부터 계산하였다. 수액기에서 냉매의 충전량: 단지 원통형 수액기가 고려되었다. 중량 계산은 그것이 수직인가 혹은 수평인가에 따라 달랐다. Vrinat 등의 식이 탱크에서 액체적의 평가에 유용하였다.

## (5) 감소된 냉매 충전량 시스템의 설계

충전량을 줄이는 냉동 플랜트를 설계하는 다른 효과적인 변수들은 시스템의 구성, 냉매, 관들의 직경과 길이, 수액기의 크기 그리고 팽창 장치와 열교환기의 기술이다. 시스템 구성의 영향: 직접과 2차 냉동 사이의 선택은 직접 팽창과 만액 증발기와 같이 단독 블록과 분할

시스템, 단일과 복합단 압축기 유닛은 분명히 냉매의 충전과 에너지 효율에 영향이 있다. 2차 냉동 구조는 시스템의 냉매 충전량 감소에 우호적이다. 2차 냉매 시스템의 선택이 성능의 감소와 동반하기 때문에, 그 결정은 총 등가온난화지수(TEWI: Total Equivalent Warming Impact)의 견지에서 선택되어야 한다.

## (6) 낮은 온도(<-20℃)에서, 대개의 냉매는 2단 압축이 필요하다.

그것은 캐스캐이드 냉동 시스템에 의해서 얻어졌다. 2단 압축 구조는 중간 수액기가 요구된다. 증발기의 공급 모드는 직접팽창 혹은 펌프나 증력에 의한 만액식 냉동방식이다. 그것은 보다 높은 성능 때문이다.

## (7) 냉매의 선택

냉매의 가장 중요한 특성은 낮은 액의 밀도, 높은 잠열, 낮은 가스 비체적 및 낮은 액상 비열 등이다. R-22로부터 프로판 혹은 암모니아로 충전한다면, 그 필요한 충전량은 반으로 줄어든다. 그것은 낮은 밀도 때문이다. 밀도의 저하는 잠열보다 훨씬 더 중요하다.

## (8) 암모니아의 증발 잠열이 R-22보다 여섯 배 높다.

대체 냉매로서 프로판이 암시되었다. 그것의 액 밀도가 낮고, R-134a 같은 HFCs보다 열적 성능이 우수하기 때문이다. 저자들은 증발기에서 45%의 충전량을 줄일 수 있다는 것을 지적하였다.

## 7.3 최근의 증기압축 냉동시스템들에 대한 시뮬레이션 기술

B. F. Yu 등(2009)은 냉동시스템의 설계 과정은 생산품의 성능을 우수하게 만드는 것이 중요하다. 컴퓨터 시뮬레이션은 이들 목적을 효과적으로 성취 할 수 있는 중요한 방법이다.

생산품의 실제적인 성능은 예측된 것으로부터 벗어나기 때문에, 바람직한 성능을 가지는 제품을 만들기 위하여, 성능의 테스트와 그 구조의 수정을 반복해야한다.

그러나 그것은 제작 단가를 증가시키고 설계 과정을 지연시킨다. 컴퓨터 시뮬레이션 방법은



냉동 시스템 설계에 사용돼왔다. 시뮬레이션 방법과 함께 작업 상태와 생산품의 요소의 형상들이 처음 주어지고 성능이 예측된다. 마지막으로 성능 예측의 근거로 제품의 요소들이 평가되고 시뮬레이션에서는 다음 사항이 포함된다. 안정성, 신속성, 그리고 정확도 이다.

#### 7.4 온실가스 감축을 위한 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 순환연소 기술

Jie Xiong 등(2009)의 연구에서 순산소연소법(Oxy-combustion)은 기존의 일반 화력발전소와 냉동 공기분리공정을 결합한 기술로 석탄화력발전소에서 고순도의 이산화 탄소를 생산할 수 있는 기술이다.

순산소연소법에서는 기존의 공기 대신에 95%의 산소를 이용하여 연소를 시킨다. 연소가스의 70~80%는 연소공기의 질소를 대신하여 열전달을 위하여 보일러에 다시 순환된다. 남은 연소가스는 순도 95% 이상의 이산화탄소 가스로 냉각하여 수분을 제거하고, 응축되지 않는 아르곤, 산소 및 질소를 제거한 다음 후처리 공정으로 간다. 일반의 공기 연소법에 비하여 순산소연소법은 NO<sub>x</sub> 발생량은 적고 SO<sub>x</sub> 발생량은 비슷하다.

순산소연소법에서 저유황 석탄을 사용하면 탈질(deNOX)설비와 탈황(deSOX)설비를 없앨 수도 있다. 그러나 고 유황석탄을 연소시킬 때는 순산소연소법을 채택하더라도 탈황설비를 설치해 야하며 연소가스가 계속 순환되므로 석탄연소에서 발생하는 아황산가스가 농축이 되어 탈황 되어 탈황설비 설치비용도 기존에 비하여 많이 싸진다.

#### 7.5 에너지 소비의 탈탄소화 방법들

R. Shinnar(2008)은 화석에너지의 소비 감축은 다음 세 가지 방법으로 이를 수 있다.

(1) 총 에너지 수요의 감축, (2) 대체에너지 사용으로의 전환, (3) 석탄 대신 H<sub>2</sub>의 사용으로 전환 및 동 시에 CO<sub>2</sub>의 분리(포집과 저장)가 그에 해당한다.

그러나 모든 대체에너지 사용들에 제약이 있어서, 포괄적 탈탄소화 계획은 한 종류의 대체 에너지에만 의존 할 수 없다.

### 8. 결 론

1) 오존층 감소와 지구의 온난화는 공기조화와 냉동 분야에 대한 하나의 두드러진 결과를 남겼다. 여러 가지 국제적 협약들과 외교 관습들은 산업체가 적은 수의 선택들을 하게했다. 유럽 규제로서, 비자동차용 불소화가스 규칙(RegulationNo 842/2006)에서, HCFCs 뿐만 아니고, HFCs까지도 엄격하게 제한다. 이들 기본적인 이슈들과 관계들은 잘 알려진 자연 냉매인 암모니아를 논의하게 했다. 간접적인 냉각으로, 암모니아의 사용은 중요한 이슈가 되지 못했다.

2) 논문들은 탄화수소들, 프로판, 프로필렌 그리고 이소부탄의 상태량들을 연구하였다. 그들을 R-22, R134a 그리고 암모니아와 비교하였다. 탄화수소의 가연성의 위험성은 냉매의 최소 주입량에 대한 시스템, 제작 중에 누설의 검지에 대한 주의, 최소수의 연결을 가진 밀폐형 설계, 스파크 검사용 전기 부품의 사용 그리고 제한된 공간들의 환기 등을 설계해 줄일 수 있다.

3) 탄화수소를 사용하는 열펌프 혹은 냉동 시스템의 건물 공조기 그리고 설계에 대한 대개의 부품은 유망하다. 중요한 부품들에 대하여 압축기 공급은 약 1~20kW 사이의 냉각용량에 대하여 아주 제한되어 있다. 압축기의 높은 실패는 윤활유에서 탄화수소의 높은 용해성으로부터 결과이다. 이 문제는 높은 점성오일로 전환, 크랭크 케이스 히트 그리고 액 라인과 흡입라인 사이에 내부 열교환기를 사용해 해결되었다.

4) 탄화수소가 불화탄소 냉매와 유사하고, 열물학적 상태량들이 우수하여, 열교환기의 열전달 향상과 탄화수소를 가진 시스템의 성능계수는 불화탄화수소의 것보다 높다. 매끈한 수평튜브의 응축열전달은 Nusselt 이론으로 잘 설명되었다. Nusselt 이론에서 고려되지 않은 상태량들의 영향 때문에, 다른 특성들이 강화된 튜브에서 나타났다. 혼합된 탄화수소가 적당한 상태량을 얻기 위해서 사용되었기에, 혼합된 증기 응축의 모델들이 고찰되었다.

5) N<sub>2</sub>O의 오존층에 대한 전반적인 영향은 복잡적이고, 1987년 9월 Montreal 의정서에서 다뤄진 물질들(CFC, 할론, 사염화탄소, 메틸클로로포름)과는 매우 다르다. 화학반응에 관한 수많은 불확실성이 존재한다. 이 경우에 N<sub>2</sub>O의 오존층에 대한 부정적 효과에 대해서는 의심할 바 없으나, 그것의 오존 감소가능성의 양적 기체에 대한 일치가 없다. N<sub>2</sub>O는 또한 대기 중의 적외선을 강력하게 흡수함으로써 발생하는 현상인 온실효과에 기여한다.

6) SF<sub>6</sub>과 SF<sub>6</sub> 분해물의 특성들 중 일부는 지구온난화와 같은 환경위험이 있고 분해제품에 노출 시에는 부작용이 있으므로 습식/건식 등의 회수방법을 사용하여 관리할 것을 권장하고 있다. SF<sub>6</sub>은 비교적 낮은 독성과 화학안전성으로 일련의 환경규제로부터 면제되었지만 퍼플루오로화합물(perfluorocompound)은 지구온난화 등의 일부 환경위험이 있고 그 분해제품에 노출 시에는 부작용이 있으므로 습식/건식 등의 회수 방법을 사용하여 통제해야한다.

7) 현재 중국정부에서는 탄소세의 도입은 고려하지 않고 있으나, 장래에 탄소세를 도입한다면 순 산소 연소법을 채택한 발전소의 발전단가가 기존의 발전소의 발전단가 보다. 싸져서 충분한 경쟁력을 가질 수 있다.

ABC(Atmospheric Brown Cloud)에 대한 연구는 글로벌과 지역적인 기후변화에 대한 ABCs의 영향감소와 HKHT빙하의 퇴각에 희망을 준다. 검댕이 ABCs의 부적인 영향에 기여하므로 남서부아시아 지역서 나무, 석탄, 소똥과 같은 고체연료의 사용을 적극 줄여야 한다. 농촌지역의 가난 사람들의 생활수준을 개선하고 실내흡연을 최소화해야 할 것이다.

### 후 기

본 논문자료는 교육과학기술부의 기금사업으로 한국과학기술정보연구원 고정력 과학기술인을 활용한 기술정보분석사업으로 그 성과를 발표합니다.

### 참 고 문 헌

- 1) 김명수, "지구대기감시 관측소 운영", 기상연구소 (2007)
- 2) 이명화, "친환경 세정 및 제조 토너카트리리지 기술지원 사업", 한국생산기술연구원 (2008)
- 3) 송중섭, "국제공동연구개발사업(한-러 공동연구사업)", 한국산업기술평가원, (2002)
- 4) 이성재, "열부하 제어용 모듈형 캐비닛 쿨러 개발", 한국산업기술평가원, (2002)
- 5) 송성호, "독립 운전식 친환경 고효율 운송냉장 시스템 개발", 한국산업기술평가원 (2002)
- 6) 정동수, "마이크로 핀이 달린 알루미늄 판관에서 HCFC22 대체 냉매의 응축열전달 특성 규명", (2003)
- 7) 인하대학교 윤영기, "고분자 전해질 연료전지 핵심원천 및 응용기술 개발", 한국에너지연구원, (2006)
- 8) 한인근, "탄화수소 냉매를 적용한 고효율 열펌프 시스템의 개발", 에너지관리공단 (2003)
- 9) 전기원, "대체 기초유분 제조기술 개발", 한국화학연구원, (2008)
- 10) 김광제, "막반응기를 이용한 메탄 Activation 기술", 한국과학재단, 2002.
- 11) 길상인, "고효율 저공해 환경에너지 기계기술 개발", 한국기계연구원, 2006,
- 12) 윤왕래, "천연 가스로부터 수송용 오일 생산 핵심 요소 기술", 한국에너지기술연구원, (2006)
- 13) 조순행, "에너지 한계 극복 기술 개발", 한국에너지연구원, (2008)
- 14) 조정숙, "메타게놈 정보 활용 non-CO<sub>2</sub> 온실가스 및 악취 동시 저감기술", 이화여자대학교, (2008)
- 15) 정산권, "극저온 냉동 기술", 한국과학재단, (2007)
- 16) 농촌진흥청, "질소 사용 수준별 아산화질소 배출계수 개발", (2009)
- 17) 농촌진흥청, "벼 논에서의 아산화질소 배출계수 개발" (2009)
- 18) 김대성, "반도체 및 LCD 공정 후 배출되는 SF<sub>6</sub>가스 제거용 화학반응 고정제 개발", (2007)

- 19) 최승길, “SF6-free 친환경 폴리머 개폐기의 개발”, (2007)
- 20) 김양도, “지구온난화 지수가 큰 SF6 분리 및 회수 신 공정 연구”, (2007)
- 21) 전의찬, “온실가스국가배출계수 마련을 위한 기반 연구”, 세종대학교, (2003)
- 22) Kim, H. G. and Bezerghi, A., *J. Fluid Mech.*, **20**, **5**, 449, (1995)
- 23) Zabid Ayub, *International Journal of Refrigeration*, **31**, 652, (2008)
- 24) Bjorn Palm, *International Journal of Refrigeration*, **31**, 552, (2008)
- 25) Masaru Ichikawa, *J. of Japan Institute of Energy*, **86**, **4**, 249, (2007)
- 25) Akio Miyara, *International Journal of Refrigeration*, **31**, 621, (2008)
- 26) Guoliang Ding, Haitao Hu, Xiangchao Huang, Bin Deng, Yifeng Gao, *International Journal of Refrigeration* **32**, 150, (2009)
- 27) Wen-Tien Tsai, *Journal of Fluorine Chemistry*, **128**, 1345, (2007)
- 28) F. Poggi, H. Macchi-Tejeda, D. Leucq, Bontemps, *International Journal of Refrigeration* **31**, 353, (2008)
- 29) B. F. Yu, Z. B. Hu, M. liu, H. L. Yang, Q.X. Kong, Y. H. Liu, *International Journal of Refrigeration* **32**, 2, (2009)
- 30) R. Shinnar, F. Citro, *sechnology in Society*, **30**, **1**, 1, (2008)
- 31) L. Barelli, et. al, *Energy*, **33**, 554, (2008)
- 32) Mohammed Youbi-Idrissi, Jocelyn Bonjour, *International Journal of Refrigeration* **31**, 165, (2008)
- 33) L. Mei, Y. J. Dai, *Renewable & sustainable energy reviews*, **12**, 662, (2008)
- 34) Stephan Kotthoff, Dieter Gorenflo, *International Journal of Refrigeration* **31**, 572, (2008)
- 35) Ozer Kara, Koray Ulgen, Arif Hepbasli, *Renewable & sustainable energy reviews*, **12**, 1383, (2008)
- 36) Sira Saisorn, Somchai Wongwises, *Renewable and sustainable energy reviews*, **12**, 24, (2008)
- 37) Y. Q. Yu, Zhang J. Y, Wu, R. Z. Wang, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **12**, 1302, (2008)
- 38) A. S. Dalkilic, S. Wongwises, *International Journal of Heat and mass Transfer*, **52**, 3409. (2009)
- 38) V. Ramanathan, Y. Feng, *Atmospheric Environment* **43**, **1**, 37, (2009)
- 39) Jie Xiong, Haibo Zhao, Chuguang Zheng, Zhaohui Liu, Lingda Zeng, Hao Liu, Jianrong Qiu, *Fuel*, **88**, 11, (2009)
- 40) Haydee S. Steinbach and Roberto Alvarez, *Journal of Environmental, Quality*, **35**, **1**, 3, (2006)
- 41) Shang-Shyng Yang, Chao-Ming Lai, Hsiu-Huan Chang, Chia-Bei Wei, *Renewable Energy*, **34**, 1916, (2009)

---

(접수:2010.03.22, 수정:2010.06.22, 게재 확정:2010.08.20)