

KEMCO-2005-32-Y

산업공정부문 온실가스 배출량 분석기반 구축: 석유화학 및 합성가스 중심으로

An Analysis on the Emissions from Petrochemical
Industry and Consumption of HFCs, PFCs and SF₆

(최종보고서)

2005. 12

에너지관리공단

제 출 문

에너지관리공단 이사장 귀하

본 보고서를 “산업공정부문 온실가스 배출량 분석기반 구축: 석유화학 및 합성가스 (HFCs, PFCs, SF₆)중심으로” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005. 11. 29.

사업주관기관명 : 에너지경제연구원
수행책임자 : 유 동 현 연구위원
연구원 : 노 동 운 연구위원
 신 정 수 책임연구원
공동수행기관명 : LG화학(주)
수행책임자 : 원 성 희

차 례

<요약>	1
I. 서론	5
II. 합성가스의 온실가스 배출잠재량	9
1. 온실가스 배출량 추이	9
가. 개요	9
나. 산업공정 부문	12
2. 합성가스별 소비량	19
가. HFCs	21
나. PFCs	25
다. SF ₆	28
3. 합성가스별 소비량 조사 네트워크 대안	29
가. HFCs	29
나. PFCs	40
다. SF ₆	44
III. 석유화학 공정배출 분석방법론	51
1. 개요	51
2. 공정배출량 계산방법론	59
가. 직접측정	60
나. 물질수지	63
다. 배출계수	66
3. 의사결정도	70
4. 배출량 계산의 QA/QC 및 불확실성	76
가. QA/QC 개요	76

나. 불확실성 유형	78
IV. 석유화학 공정분석 및 공정배출 확인	85
1. 석유화학 공업 개요	85
2. NCC 공정	90
가. 제품 개요	91
나. 공정 개요	92
다. 공정배출량 발생 위치 확인	96
라. 공정배출 분석방법론 적용	98
3. BTX 공정	100
가. 제품 개요	100
나. 공정 개요	103
다. 공정배출량 발생 위치 확인	108
라. 공정배출 분석방법론 적용	108
4. BD 공정	108
가. 제품 개요	109
나. 공정 개요	110
다. 공정배출량 발생 위치 확인	112
라. 공정배출 분석방법론 적용	112
5. VCM 공정	112
가. 제품 개요	113
나. 공정 개요	114
다. 공정배출량 발생 위치 확인	118
라. 공정배출 분석방법론 적용	120
6. SM 공정	121
가. 제품 개요	121
나. 공정 개요	122
다. 공정배출량 발생 위치 확인	127
라. 공정배출 분석방법론 적용	128

V. 결론 및 향후 과제	129
참고문헌	133

표 차례

<표 II-1> 온실가스 배출 관련 주요지표 (1990~2003)	10
<표 II-2> 온실가스 배출/흡수 부문별 추이 (1990~2003)	10
<표 II-3> 온실가스별 배출추이 (1990~2003)	11
<표 II-4> 국가 온실가스 배출통계 추이 (1990~2003)	12
<표 II-5> 산업공정부문의 온실가스 배출 (1990~2003)	13
<표 II-6> 암모니아 생산에 따른 온실가스 배출량 추이(1990~2003)	14
<표 II-7> 아디핀산 생산에 따른 온실가스배출량 추이 (1990-2003)	15
<표 II-8> 질산생산에 따른 N ₂ O, NO _x 배출 추이 (1990~2003)	16
<표 II-9> 석유화학 제품 생산에 따른 CH ₄ 배출 (1990~2003)	16
<표 II-10> 석유화학 제품별 NMVOCs 배출 추이 (1990~2003)	17
<표 II-11> 석유화학 제품별 SO ₂ 배출 (1990~2003)	17
<표 II-12> Carbon Black의 CO, NO _x 배출 (1990~2003)	18
<표 II-13> HFCs, PFCs, SF ₆ 소비에 따른 배출량 추이 (1990~2003)	19
<표 II-14> 특정물질의 용도별 소비량	20
<표 II-15> 주요 R-400 류와 R-500 류의 냉매종류별 특성	22
<표 II-16> HFCs 수입량 추이	23
<표 II-17> 냉매 종류 및 업체의 구매량 (2004)	24
<표 II-18> HFCs 종류별 수입업체 리스트 (2004년말 기준)	24
<표 II-19> 기존 냉매와 대체 가능 냉매	25
<표 II-20> 반도체 제조공정과 발생물질	27
<표 II-21> 공정별 배출 PFCs 기체	27
<표 II-22> 반도체 및 LCD 공정용 구매량 및 기존 PFCs 비교	28
<표 II-23> 하향식 접근법을 위한 IPCC 기본 값	37
<표 II-24> 반도체 공정용 배출량의 투명성 확보를 위한 정보	43

<표 II-25> 증전기기용 SF ₆ 배출량 산정을 위한 Tier별 모범사례 정보	48
<표 III-1> 산업공정별 온실가스 배출원 및 가스종류	56
<표 III-2> 석유화학 제품의 CH ₄ 배출계수 : GL 96	57
<표 III-3> 공정배출량 측정방법론의 종류	60
<표 III-4> 방법론별 연간 공정 온실가스 배출량 계산방법	72
<표 IV-1> 사업장별 에틸렌 생산능력	91
<표 IV-2> 사업장별 프로필렌 생산능력	92
<표 IV-3> 납사 분해로의 투입·산출물 종류	97
<표 IV-4> DEA Absorber 및 Caustic and Water Wash Tower의 투입·산출물 종류	98
<표 IV-5> 조사대상 NCC 분해설비의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성	99
<표 IV-6> 사업장별 벤젠 생산능력	101
<표 IV-7> 사업장별 톨루엔 생산능력	102
<표 IV-8> 사업장별 자일렌 생산능력	102
<표 IV-9> 사업장별 부타디엔 생산능력	110
<표 IV-10> 사업장별 EDC 생산능력	113
<표 IV-11> 사업장별 VCM 생산능력	113
<표 IV-12> EDC 반응공정의 투입·산출물 종류	119
<표 IV-13> 조사대상 EDC 반응공정의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성	121
<표 IV-14> 사업장별 SM 생산능력	122
<표 IV-15> Smart Reactor의 투입·산출물 종류	127
<표 IV-16> 조사대상 Smart Reactor의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성	128

그림 차례

[그림 II-1] PFCs 소비로 인한 온실가스 배출량	26
[그림 II-2] 충전기기용 SF ₆ 소비량	29
[그림 II-3] 오존과괴물질 (ODS) 대응의 모든 대체물질에 대한 일반적인 결정도	38
[그림 II-4] 반도체 제조시의 FC 배출량 추정 방법론 결정도	42
[그림 II-5] 전기 장비에서의 SF ₆ 에 관한 결정도	46
[그림 III-1] The Greenhouse Gas Protocol의 온실가스 배출유형 분류체계	52
[그림 III-2] 석유화학공정의 비에너지부문 온실가스 배출유형	54
[그림 III-3] 방법론 별 상대적 배출량 신뢰도 및 투입노력	70
[그림 III-4] 공정 온실가스 배출량 계산방법론 선정을 위한 의사결정도	72
[그림 III-5] 온실가스 배출량 산정과 관련된 불확실성	79
[그림 IV-1] 석유화학 공업 체계	86
[그림 IV-2] 석유화학 공업 계통도	87
[그림 IV-3] 조사대상 10개 제품의 생산 공정 Chain	88
[그림 IV-4] NCC 공정 개략도	93
[그림 IV-5] BTX 제조공정 개략도	103
[그림 IV-6] 수첨공정 개략도	104
[그림 IV-7] 추출공정 개략도	106
[그림 IV-8] 탈알킬공정 개략도	107
[그림 IV-9] BTX 정제공정 개략도	108
[그림 IV-10] BD 제조공정 개략도	111
[그림 IV-11] EDC 및 VCM 공정 개략도	114
[그림 IV-12] EDC 반응공정 개략도	115

[그림 IV-13]	EDC 정제공정 개략도	116
[그림 IV-14]	EDC 열분해공정	117
[그림 IV-15]	VCM 정제공정	118
[그림 IV-16]	SM 제조 공정 개략도	123
[그림 IV-17]	에틸벤젠 반응공정 세부 공정도	124
[그림 IV-18]	에틸벤젠 증류공정 세부 공정도	125
[그림 IV-19]	SM 반응공정 세부 공정도	126
[그림 IV-20]	SM 증류공정 세부 공정도	127

요 약

1. 연구 필요성 및 목적

HFCs, PFCs, SF₆로 구성되는 합성가스는 CFCs 대체물질로서 현재 광범위하게 사용되고 있으며, 향후 기존의 CFCs를 대체할 가스이다. 그럼에도 우리나라는 이들 가스 소비패턴은 물론 소비량에 대한 정보가 없는 실정이다. 따라서 국가 온실가스 인벤토리 관리 및 효율적 대응방안 마련을 위한 소비량 및 소비패턴에 대한 연구를 통해 그 분석기반을 마련하고자 한다.

석유화학부문은 철강, 정유, 발전 업종과 함께 국내 에너지 다소비 업종으로써 국가 및 기업 온실가스 배출통계 구축이나 온실가스 감축 정책을 시행하고자 할 때 반드시 포함되어야 할 중요 업종이다. 탄소함량이 높은 납사를 1차 원료로 하여 여러 단계의 화학결합·분리 과정을 통해 석유화학제품이 생산되며, 이 과정에서 원료속에 포함되어 있는 탄소성분이 산소와 결합하여 공정 온실가스가 배출된다. 다른 업종과 달리 석유화학 업종은 이러한 공정배출량이 전체 온실가스 인벤토리의 상당부분을 차지할 것으로 보이며, 석유화학부문의 정확한 온실가스 배출통계 구축을 위해서는 이러한 공정배출현상의 해석이 필수적이다.

본 연구에서 제안된 방법론은 대상 공정의 기술적 특성을 충분히 반영할 수 있도록 개발되어야 하며 본 연구에서 제시되는 방법론은 실제 공정 온실가스 발생공정에서의 적용가능성을 검토해야 할 것이다. 본 연구를 통해 기업 및 국가 온실가스 배출통계 작성과 이러한 통계의 지속적인 관리에 기여하고, 또한 향후 배출권거래에 즉시 도입될 수 있도록 개발된 분석방법론을 실제 현장에 적용해 보고, 예상 난제들

을 사전에 최소화 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

공정배출의 해석은 배출량 산정방법론, 의사결정도, QA/QC 방안이 종합적으로 동시에 수립되어야만 보다 정확하고 효율적인 해석이 가능하고 주요인자의 체계적인 사후 관리가 가능할 것이다.

2. 연구 결과

우리나라의 온실가스 배출량을 1995년 이후 2003년간 기간에 대해 추세분석을 해 보면, 산업공정 배출원 가운데 합성가스 소비의 추세기여도가 매우 높게 나타난다. 이는 1995년 이후 합성가스소비량 변화가 크게 일어나면서 배출량 변화 폭이 컸던 것에 기인하는 것이다. 이는 현재의 배출량 변화 추세 상에서 합성가스 소비가 중요한 비중을 점하지만 향후 우리나라 온실가스 배출전망에 있어서도 합성가스 중요성이 강조될 수 있음을 예시하는 것으로도 받아들일 수 있을 것이다. 왜냐하면 HFC를 중심으로 몬트리올 의정서의 규제를 받는 CFCs 대체가 급격히 일어난다면 그로 인한 배출량 증가는 클 것이기 때문이다.

몬트리올 의정서에서 규제를 받는 오존층파괴물질에 관한 개발도상국인 우리나라는 향후 CFCs 대체라는 점에서 잠재력이 큼에도 불구하고 우리나라의 합성가스 관련 자료는 매우 일천한 수준에 있다. 특히 다양한 용도로 사용되고 있는 HFCs 소비 자료는 더더욱 그러하다. 이러한 현실을 감안하여 본 연구에서는 합성가스 소비과정에서 배출되는 온실가스 배출량을 보다 안정적이고 정확하게 산정하기 위해서는 어떤 방식으로 어느 자료를 수집해야하는 것인가에 대한 답을 제시하려하였다.

HFCs를 용도별로 구분해서 각 용도별로 자료여건을 감안한 자료수집 대안을 제시하고 있으나 대안마련이 마땅치 않을 경우에는 차선책으로 대체안에 대해서도 언급하고 있다. 이러한 자료수집 대안은 현재의 여건에서 당장 적용하기 어려운 것도 있

다. 그럼에도 대안으로 제시하고 있는 것은 그러한 대안을 염두에 두고 자료수집 여건을 차근차근히 만들어나가야 한다는 당위론적 필요성 때문이다.

아울러 본 연구에서는 석유화학업종의 공정 온실가스 배출량을 계산할 수 있는 7개 방법론을 개발하고, 공정의 자료 확보가능성 및 관련 정보의 신뢰도에 따라 최적의 방법론을 선택할 수 있는 의사결정도를 제시하였다.

공정 온실가스 배출량 계산방법은 계산결과의 신뢰도 순으로 연속측정, 주기측정, 물질수지, 측정배출계수, 탄소수지, 설계배출계수, 공인배출계수가 제안되었다. 물론, 이들 방법론의 신뢰도는 기초자료의 확보가능성과 자료의 정확성에 따라 달라진다. 석유화학 공정의 현장조사과정에서 방법론들을 적용해 본 결과 주기측정, 측정배출계수, 탄소수지, 설계배출계수, 공인배출계수 방법이 적용 가능하였다. 연속측정방법은 계측기의 신뢰도 문제로 조사 대상 공정에는 적용하기 어려웠다. 일부 공정에서는 측정위치 확보의 어려움으로 주기측정, 측정배출계수방법은 적용이 용이하지 않았다. 탄소수지 및 설계배출계수는 대부분의 공정에 적용 가능하였다.

개발된 공정 온실가스 배출량 계산방법과 의사결정도는 국내 석유화학 산업의 대표적인 10개 제품을 생산하는 공정에 적용해 보았다. 석유화학 공정 온실가스 배출원 조사는 국내 석유화학 부문의 대표제품으로써 기초유분인 에틸렌, 프로필렌, Mixed-C4, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 부타디엔과 대표적인 모너머 제품인 EDC, VCM, SM의 10개 제품이다. 현장 조사 결과, 이들 10개 제품은 설비기준으로 볼 때 NCC공정, BTX공정, BD공정, VCM공정, SM공정의 총 5개 공정에서 생산되고 있었다. 공정 배출의 확인 및 배출량 분석방법론의 적용은 제품 단위가 아닌 이들 5개 공정단위로 실시하였다.

조사 대상 10개 석유화학 제품 및 공정에 대해서는 각 제품 및 제조공정의 특징을 조사하여 기술하였다. 조사 과정에서 각 공정의 전문가 회의를 개최하고, PIS 계통화

인, 설계자료 확인 작업을 통해 공정 온실가스가 발생여부를 조사하였다. 조사 결과 NCC공정의 납사분해로, VCM공정의 EDC 반응로, SM공정의 Smart Reactor에서 공정 이산화탄소가 배출되는 것을 확인하였다. VCM공정의 EDC반응로에는 온실가스 배출량을 산정할 수 있는 계측기가 설치되어 있었다. 그러나 이 계측기로부터 수집되는 온실가스 정보는 공정의 정상 운전상태를 모니터링 하기 위한 용도로 이용되고 있으며, 실제 샘플을 채취하여 분석해 본 결과값과, 설계자료와는 많은 차이를 보이고 있었다. 따라서 연속측정 설비가 설치되어 있음에도 본 연구에서 가장 신뢰도 높은 계산 방법론으로 제안한 연속측정방법을 적용하여 배출량을 계산할 수 없었다. NCC공정과 SM공정에는 설계배출계수를 적용할 수 있었다.

NCC공정 및 VCM공정에서는 공정 온실가스인 이산화탄소를 제거하는 설비가 확인되었다. NCC공정에서는 분해로에서 발생된 공정 이산화탄소가 후 공정의 반응로에서 촉매작용을 방해하므로 전량 제거할 수 있도록 2단계의 제거시스템이 가동되고 있었다. 제거율은 100%이다. VCM 공정에서는 공정 이산화탄소가 공정 내부를 순환하면서 농도가 높아지는 것을 방지하기 위해 이산화탄소량의 일정 비율을 연속적으로 제거하는 공정이 설치되어 있었다. 이산화탄소 농도를 일정수준 이하로 유지하는 것이 목적이므로 NCC 공정처럼 전량 온실가스가 제거되지는 않는다. 기업에서 공정 고유의 온실가스 배출계수를 작성하고자 할 때에는 이러한 제거공정의 효율도 반영하여야 한다.

I. 서론

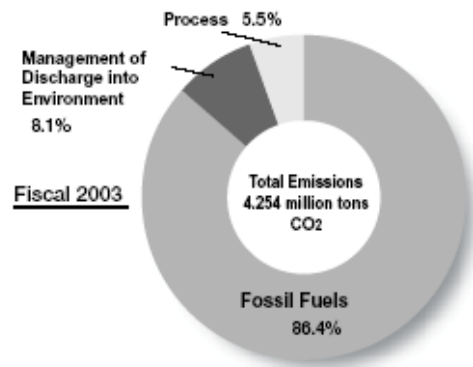
기후변화협약의 시행령이라 할 수 있는 교토의정서가 2005년 2월 발효됨에 따라 선진국들의 온실가스 감축의무 이행이 현실화되고, 청정개발체제 및 배출권거래가 더욱 활성화되고 있다. EU에서는 올해 초 배출권 거래를 시작하였다. 년초 10유로 수준이던 배출권 가격은 올 6월에 30유로를 정점으로 10월 중에는 22유로 선을 유지하고 있다. 이러한 가격상황에서, 앞으로 배출권을 시장에 공급할 여력이 있을 것으로 전망되는 기업들은 이미 이익이 얼마나 될 지를 계산하고 있을 것이다. 반대로, 할당량을 채우기 위해 배출권을 구매해야 하는 기업은 증가하는 배출권 가격을 두려움 속에서 바라보고 있을 것이다.

국내 기업들도 이러한 국제 정세에 직·간접적으로 영향을 받고 있다. 일부 기업들은 청정개발체제 사업에 적극 참여하여 온실가스 감축실적을 해외에 판매함으로써 새로운 시장에서 기회를 발굴하고 있다. 또한, 온실가스를 거의 발생시키지 않는 신재생 시장도 빠른 속도로 확대되고 있으며, 관련 기술을 보유하고 있는 기업들은 새로운 시장에서 새로운 사업 기회를 누리고 있다. 이러한 긍정적인 영향의 반면에 대다수의 기업들은 기후변화협약이라는 국제적 환경이슈가 가지고 올 부정적 영향에 대비하기 위한 노력에 박차를 가하고 있다.

온실가스는 기후변화협약 대응의 기초이며, 산업공정은 국내 온실가스배출량의 12% 정도를 점유하는 중요한 배출원이다. 대내외적인 기후변화협약 대응력 제고를 위해서는 신뢰도 높은 기업, 국가의 온실가스 배출량 분석이 선행되어야 할 것이다. 특히 지구온난화지수가 CO₂의 수백 배에서 수천 배에 달하는 합성가스 분야는 장기적으로 배출량이 증가할 가능성이 큰 분야라는 점에서 상세한 배출 관련 자료와 면밀한 분석이 요구된다. 그럼에도 우리나라의 합성가스 소비량 자료는 아직 통계화되

지 못하고 있는 실정에 있어 본 과제를 통해 배출량 분석을 위한 기반구축 차원에서 HFCs, PFCs 및 SF₆ 가스 소비량 파악을 위한 대안을 찾아보고자 한다.

국내 에너지 다소비 업종중의 하나인 석유화학 산업은 기후변화협약에 따른 온실가스 감축요구에 상당한 타격을 받을 수 있는 업종중의 하나이다. 이러한 영향이 얼마 만큼인지, 또 어떻게 이러한 영향을 최소화할 것인지를 판단하기 위해서는 제일 먼저 각 기업의 온실가스 배출통계 구축작업이 선행되어야 한다. 석유화학부문은 철강, 정유, 발전 업종과 함께 국내 에너지 다소비 업종으로써 국가 및 기업 온실가스 배출통계 구축이나 온실가스 감축 정책을 시행하고자 할 때에도 반드시 포함되어야 할 업종이다. 탄소함량이 높은 납사를 1차 원료로 하여 여러 단계의 화학결합·분리 과정을 통해 석유화학제품이 생산되며, 이 과정에서 원료 속에 포함되어 있는 탄소 성분이 산소와 결합하여 공정 온실가스가 배출된다. 다른 업종과 달리 석유화학 업종은 이러한 공정배출량이 전체 온실가스 인벤토리의 상당부분을 차지할 것으로 보이며, 석유화학부문의 정확한 온실가스 배출통계 구축을 위해서는 이러한 공정배출현상의 해석이 필수적이다.



[배출유형별 배출량 : 스미토모화학 2004 RC Report]

석유화학 업종은 대부분의 직·간접 온실가스 배출량 도출은 용이하나, 공정배출은 그 배출현상이 다양하면서도 기업 배출통계에서 차지하는 비율도 높을 것으로 예

상되어 본 연구를 통해 그 분석기준을 확립하고자 하였다. 일본의 메이저급 석유화학 회사인 스미토모화학은 「2004 Responsible Care Report」에서 연간 총 배출량 4,254 tCO₂ 중 5.5%인 235 tCO₂가 공정부문에서 배출되는 것으로 보고하고 있다.

공정 온실가스 배출량을 산정하기 위해서는 탄소가 연소하면서 배출되는 온실가스의 배출량 계산 방법과는 다른 보다 복잡한 계산기준이 적용되어야 한다. 연소반응으로 생성되는 온실가스 배출량은 연료원의 사용량 자료만 확보되어 있으면 어렵지 않게 국제사회에서 인정받을 수 있는 수준의 배출량 계산이 가능하나, 공정배출은 그 공정만의 물질 반응특성을 반영해야 함을 물론이고, 데이터의 확보가능성 등에 따라 측정, 물질수지 분석, 설계자료 기반 분석, 배출계수 이용 등 등 여러 가지 산정방법을 동원해야 한다.

본 연구에서는 우선 1차적으로 국내 주요 석유화학제품에 대한 공정배출 유무를 조사하고, 공정배출이 발생하는 공정에 대해서는 공정배출량 해석에 이용할 수 있는 다양한 방법론의 구축이 필요하며, 이러한 다양한 방법론 중 공정특성, 데이터 확보가능성 등에 따라 최적 방법론을 선정할 수 있는 의사결정도를 제시하고자 하였다. 또한 공정 배출량 계산에 필요한 주요인자들의 QA/QC 기준을 연구 결과물로 도출하고자 하였다.

본 연구에서 제안된 방법론은 대상 공정의 기술적 특성을 충분히 반영할 수 있도록 개발되어야 하며 본 연구에서 제시되는 방법론은 실제 공정 온실가스 발생공정에서의 적용가능성 검토해야 한다. 본 연구가 기업 및 국가 온실가스 배출통계 작성과 이러한 통계의 지속적인 관리에 기여하고, 또한 향후 배출권거래에 즉시 도입될 수 있도록 개발된 분석방법론을 실제 현장에 적용해 보고, 예상 난제들을 사전에 최소화해야 할 것이다. 공정배출의 해석은 배출량 산정방법론, 의사결정도, QA/QC 방안이 종합적으로 동시에 수립되어야만 보다 정확하고 효율적인 해석이 가능하고 주요인자의 체계적인 사후 관리가 가능하다.

II. 합성가스의 온실가스 배출 잠재량

1. 온실가스 배출량 추이¹⁾

가. 개요

우리나라의 온실가스 총배출량 추이를 보면 1990년에 310.6 백만tCO₂에서 2003년 582.2 백만tCO₂를 배출하여 연평균 5.0%의 배출 증가세를 나타냈으며, 인당 배출량은 1990년 이후 연율 4.1%씩 증가하여 1990년 7.2 tCO₂에서 2003년 12.2 tCO₂로 증가하였다.

한편 국내총생산에 대한 온실가스 배출량 지표인 온실가스원단위 (온실가스/GDP)는 1990년 이후 1996년까지 증가추이를 보이다 그 이후 지속적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다. 온실가스원단위는 1990년 0.968 tCO₂/백만원에서 2003년 0.879 tCO₂/백만원으로 연율 0.7%의 하락세를 기록하였다.

온실가스 배출/흡수원별 배출추이를 보면, 에너지연소 및 탈루성으로 구성되는 에너지부문에서 1990년에 247.7 백만tCO₂, 2003년 481.4 백만tCO₂를 배출하여 연평균 5.2%의 배출 증가세를 나타냈다. 동 부문의 배출비중은 1990년 80%에서 지속적으로 증가하다가 최근들어 83% 수준에 머물고 있다.

매우 다양한 배출원을 가지고 있는 산업공정 부문은 1990년 이후 연평균 10.1%의 높은 증가세를 나타낸 결과, 1990년 19.9 백만tCO₂에서 2003년 69.6 백만tCO₂로 3배가 넘는 수준으로 늘어났다. 산업공정부문의 배출량 증가는 IT 산업 발달에 따른 반도체 생산 증가, TFT-LCD 생산 증가 등이 두드러지게 기여한 것으로 판단된다.

1) 2003년 배출통계는 추정치 기준임.

<표 II-1> 온실가스 배출 관련 주요지표 (1990~2003)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
온실가스 총배출량 (A) (백만 tCO ₂)	310.6	452.8	528.6	569.3	582.2	5.0
인 구 (B) (천명)	42,869	45,093	47,008	47,640	47,925	0.9
GDP (C) (10억, 2000기준)	320,696	467,099	578,665	642,748	662,655	5.7
인당 온실가스 (A/B) (tCO ₂ /인)	7.24	10.04	11.25	11.95	12.15	4.1
온실가스/GDP (A/C) (tCO ₂ /백만원, 2000)	0.968	0.969	0.914	0.886	0.879	-0.7

주: 1. 인구 및 국내총생산 2003년은 추정치 기준임.
2. 2003년 온실가스 배출량은 추정치임.

<표 II-2> 온실가스 배출/흡수 부문별 추이 (1990~2003)

(단위: 백만tCO₂)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
에너지	247.7 (79.8)	372.1 (82.2)	438.5 (83.0)	473.0 (83.1)	481.4 (82.7)	5.2
산업공정	19.9 (6.4)	47.1 (10.4)	58.3 (11.0)	64.5 (11.3)	69.6 (12.0)	10.1
농업	17.5 (5.6)	17.8 (3.9)	16.2 (3.1)	15.8 (2.8)	15.5 (2.7)	-0.9
토지이용변경 및 임업 (흡수원)	-23.7	-21.2	-37.2	-33.4	-33.3	2.6
폐기물	25.5 (8.2)	15.7 (3.5)	15.6 (3.0)	16.0 (2.8)	15.6 (2.7)	-3.7
총배출량	310.6 (100.0)	452.8 (100.0)	528.6 (100.0)	569.3 (100.0)	582.2 (100.0)	5.0
순배출량	286.8	431.5	491.4	535.9	548.9	5.1

주: ()은 배출원의 총배출량 기준 배출비중임.

<표 II-3> 온실가스별 배출추이 (1990~2003)

(단위: 백만CO₂)

	1990	1994	1995	1996	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
합 계	310.6 (100.0)	422.1 (100.0)	452.8 (100.0)	505.2 (100.0)	528.6 (100.0)	569.3 (100.0)	582.2 (100.0)	5.0
CO ₂	258.3 (83.2)	369.5 (87.5)	401.0 (88.6)	438.3 (86.8)	464.9 (87.9)	501.9 (88.2)	510.7 (87.7)	5.4
CH ₄	43.2 (13.9)	32.6 (7.7)	28.5 (6.3)	30.6 (6.1)	26.4 (5.0)	26.3 (4.6)	25.8 (4.4)	-3.9
N ₂ O	8.0 (2.6)	11.0 (2.6)	11.9 (2.6)	12.6 (2.5)	14.9 (2.8)	14.8 (2.6)	18.1 (3.1)	6.5
HFCs	1.0 (0.3)	3.8 (0.9)	5.1 (1.1)	5.7 (1.1)	8.3 (1.6)	8.6 (1.5)	7.7 (1.3)	17.1
PFCs	n.a.	n.a.	n.a.	1.0 (0.2)	2.3 (0.4)	2.2 (0.4)	2.5 (0.4)	14.5
SF ₆	n.a.	5.1 (1.2)	6.3 (1.4)	17.0 (3.4)	11.7 (2.2)	15.6 (2.7)	17.4 (3.0)	14.6

- 주: 1. n.a.: not available
 2. 토지이용변경 및 임업부문의 배출/흡수량 제외
 3. PFCs는 1996-2003, SF6는 1994-2003 증가율임.
 4. 2003은 추정치임.

온실가스별 배출추이를 살펴보면 다음과 같다. 온실가스 배출량의 대부분을 차지하는 CO₂는 1990년 이후 연율 5.4%의 증가세를 나타내 1990년 258.3 백만tCO₂에서 2003년 510.7 백만tCO₂로 늘어났으며, 그 비중은 88%대를 보이고 있다. 배출 비중 면에서 두 번째로 높은 CH₄는 다양한 배출원을 가지는 온실가스로서 1990년-2003년 기간 중 연평균 3.9%의 감소세를 기록한 결과 그 비중이 1990년 13.9%에서 2003년 4.4%로 축소되었으며, 배출량은 1990년 43.2 백만tCO₂에서 2003년 25.8 백만tCO₂으로 감소하였다. N₂O 배출량은 1990년 8.0 백만tCO₂에서 2003년 18.1 백만tCO₂로 연평균 6.5%의 높은 신장세를 기록하였으며, 비중 역시 지속적으로 증가하는 추이이다.

CFCs 대체물질로서 냉매 위주로 사용되는 HFCs 소비에 따른 온실가스 배출량과

HCFC-22 생산과정에서 배출되는 HFC-23에 의한 배출량은 1990년 이후 연평균 17.1%의 높은 증가세를 나타내 CFCs 대체냉매 소비가 빠르게 증가하는 것으로 추정된다. 반도체와 TFT-LCD 생산공정용 가스로 소비되는 PFCs 소비에 따른 온실가스 배출량은 그동안 반도체 생산량 증가추세에 힘입어 늘어왔으나 1999년에 급격히 낮아진 이후 경기에 따라 오르내림을 보이고 있다. 그 결과 2003년 배출량은 2.5 백만 tCO₂로 1996년 이후 연율 14.5%의 증가세를 나타냈다. SF₆ 가스 사용에 따른 온실가스 배출량은 반도체 경기변동에도 불구하고 증전기기용 가스 소요량 증가에 힘입어 지속적인 증가세를 나타낸 결과 1994년 이후 연평균 14.6%의 높은 신장세를 기록하였다.

<표 II-4> 국가 온실가스 배출통계 추이 (1990~2003)

(단위: 백만tCO₂)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003
총배출량 (배출원)	310.6	452.8	528.6	548.2	569.3	582.2
1. 에너지부문	247.7	372.1	438.5	453.0	473.0	481.4
2. 산업공정	19.9	47.1	58.3	63.6	64.5	69.6
가. 광물산업	17.8	30.9	27.9	28.9	30.5	31.1
나. 화학산업	1.0	4.6	7.9	8.2	7.5	10.7
다. 금속산업	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
라. 기타산업	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
마. HFCs, PFCs, SF ₆ 생산	1.0	2.6	3.2	0.6	2.0	1.4
바. HFCs, PFCs, SF ₆ 소비	0.0	8.8	19.1	25.9	24.4	26.2
3. 솔벤트 및 기타 제품 소비	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4. 농업	17.5	17.8	16.2	15.8	15.8	15.5
5. 토지이용변경 및 임업 (흡수원)	-23.7	-21.2	-37.2	-34.6	-33.4	-33.3
6. 폐기물	25.5	15.7	15.6	15.9	16.0	15.6

나. 산업공정 부문

산업공정부문은 매우 다양한 배출원을 가지고 있으며, 제품 생산량, 원료소비, 제품 생산방식 등에 따라 배출량이 변화한다. 산업공정부문의 온실가스 배출원 특성은 비연료 배출원이라는 점이다. 즉 연료연소와 무관하게 온실가스가 공정상 혹은/그리

고 제품 소비과정에서 배출된다는 점이 “산업공정부문” 즉 공정배출의 특징이다.

동 부문의 온실가스 배출량은 경기변동에 민감하게 반응하는 모습을 보이는데 특히 1996년부터 HFCs, PFCs, SF₆ 가스소비로 인한 배출량이 추가되면서 급격히 증가하는 모습을 보이고 있다. 동 부문 온실가스 배출량의 절반 정도를 차지하는 CO₂는 1990년 이후 연율 4.1% 증가하여 2003년에 31.5 백만tCO₂를 배출하였으며, CH₄와 N₂O는 각각 같은 기간 동안 11.3%와 37.3%라는 급격한 증가세를 기록하였다.

HCFC-22 생산과정에서 배출되는 HFC-23과 냉매와 반도체제조용 공정가스 및 증전기 차단기기용으로 소비되는 합성가스 (HFCs, PFCs 및 SF₆)는 배출비중 40% (2003)를 점유하는 중요한 가스이다.

<표 II-5> 산업공정부문의 온실가스 배출 (1990~2003)

(단위: 백만tCO₂)

	1990	1995	1997	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
합 계	19.9 (100.0)	47.1 (100.0)	58.9 (100.0)	58.3 (100.0)	64.5 (100.0)	69.6 (100.0)	10.1
CO ₂	18.6 (93.7)	32.2 (68.4)	33.5 (56.8)	28.8 (49.4)	31.0 (48.1)	31.5 (45.3)	4.1
CH ₄	0.1 (0.6)	0.3 (0.6)	0.4 (0.6)	0.4 (0.7)	0.5 (0.7)	0.4 (0.6)	11.3
N ₂ O	0.2 (0.8)	3.2 (6.9)	4.3 (7.3)	6.7 (11.5)	6.7 (10.4)	10.0 (14.4)	37.3
HFCs	1.0 (4.9)	5.1 (10.8)	7.1 (12.0)	8.3 (14.3)	8.6 (13.3)	7.7 (11.0)	17.1
PFCs	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	2.2 (3.7)	2.3 (4.0)	2.2 (3.3)	2.5 (3.6)	2.3
SF ₆	0.0 (0.0)	6.3 (13.4)	11.5 (19.6)	11.7 (20.1)	15.6 (24.3)	17.4 (25.0)	13.6

주: 1. n.a.: not available
 2. PFCs는 1997-2003 증가율임.
 3. SF₆는 1995-2003 증가율임.

1) 화학산업

(가) 암모니아 생산

대부분의 암모니아는 가스(주성분 CH_4) 또는 기타 화석연료의 접촉개질(Catalytic Steam Reforming)을 통하여 제조된다. 그리고 생산과정 중 발생하는 CO_2 와 기타 불순물을 포함하고 있는 stripping gas는 요소(Urea), 액화탄산 등의 생산에 사용되거나 대기중으로 배출된다. 그러나 요소생산, 드라이아이스 생산 등과 같은 하류부문(Down Stream)에서는 일시적으로만 CO_2 를 잡아두는 관계로 암모니아 생산으로 인한 CO_2 배출량 추계 시 하류부문의 CO_2 사용량은 고려하지 않는다. 따라서 암모니아 생산공정에서 발생하는 탄소는 모두 대기로 배출되는 것으로 가정한다.

GL 962)의 고정배출계수를 사용하여 암모니아 생산으로 인한 온실가스 배출량을 추계한 결과 2003년 CO_2 가 210.7 천톤 배출되었으며, CO는 1.1 천톤, SO_2 는 0.004 천톤 배출된 것으로 나타났다.

<표 II-6> 암모니아 생산에 따른 온실가스 배출량 추이(1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
CO_2	752.9	1,123.2	671.4	309.7	210.7	-9.3
CO	4.0	5.9	3.5	1.6	1.1	-9.3
SO_2	0.02	0.02	0.01	0.01	0.004	-9.3

2003년의 암모니아 생산에 따른 온실가스 배출량이 2002년 대비 32%, 2000년의 1/3 수준으로 감소하였는데 이는 남해화학이 2002년 초에 생산을 중단함에 따른 것

2) IPCC, 1996, Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

이다.

(나) 아디핀산 생산

GL 96에서는 아디핀산 생산공정에서 배출되는 배출가스를 N₂O, NO_x, NMVOCs, CO 등의 4가지로 제시하고 있다. 이에 GL 96에서 제시한 각각의 고정배출 계수를 적용하여 아디핀산 생산에 따른 배출가스를 추계하였다. 한편, 국내 아디핀산 생산은 1992년 시작되었으나 본격적인 생산은 1993년부터 이루어졌다. 아디핀산 생산에 따른 온실가스 배출량은 2003년 N₂O 배출이 29 천톤, NO_x는 0.8 천톤, NMVOCs는 4.2 천톤, 그리고 CO는 3.3 천톤을 기록하여 '90년 이후 연평균 13.8%의 높은 증가세를 나타냈다³⁾.

<표 II-7> 아디핀산 생산에 따른 온실가스배출량 추이 (1990-2003)

(단위: 천톤)

	1992	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
N ₂ O	7.0	9.0	19.0	19.0	29.0	13.8
NO _x	0.2	0.2	0.5	0.5	0.8	13.8
NMVOCs	1.0	1.3	2.7	2.7	4.2	13.8
CO	0.8	1.0	2.2	2.2	3.3	13.8

(다) 질산생산

질산생산 시에는 N₂O 및 NO_x가 발생한다. GL 96에서는 NO_x의 경우 질산 생산 톤당 12 kg의 배출계수를 제시하고 있으나 N₂O의 경우는 단일계수를 제시하지 않고 일부 국가 (미국, 일본, 노르웨이)들의 계수를 예시하고 있다. 그리고 구체적인 생산 방식을 모를 경우, 제시된 일부국가들의 범위 값에서 적절한 상한 값을 사용할 것을 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 일본의 배출계수 중에서 상한치인 5.7 kg of N₂O/질산 ton을 원용하였다. 그 결과 우리나라의 질산생산에 따른 온실가스 배출량은 2003년에 N₂O 배출량이 3.3 천톤, NO_x 배출량은 6.9 천톤을 기록하였다.

3) 아디핀산 생산에 따른 N₂O 배출량은 CDM 사업 신청을 완료한 상태이고 양 당사국의 승인을 득 하였으므로 배출수준이 향후 감소할 것으로 전망됨.

<표 II-8> 질산생산에 따른 N₂O, NO_x 배출 추이 (1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
N ₂ O	0.5	1.4	2.5	2.6	3.3	15.1
NO _x	1.1	3.0	5.4	5.5	6.9	15.1

(라) 기타 화학제품 생산

기타 화학제품의 생산공정에서 배출되는 주요 가스는 CH₄와 NMVOCs이며, 그밖에 SO₂, CO, NO_x 등이 극히 제한된 제품(특히, Carbon Black)생산 과정에서 배출된다. CH₄는 Carbon Black, Ethylene, SM, EDC 등에서 배출되며, 우리나라의 배출량은 1990년 5.3 천톤에서 2003년에 21.4 천톤으로 약 4배 증가하였다.

한편, NMVOCs는 생산공정에서 동 가스를 배출하는 석유화학제품 13개 제품에 대하여 추계 하였다. 추계결과 NMVOCs 배출량은 1990년 44.2천톤에서 2003년 177.5천톤으로 약 4배 증가하였다. 이중에서 SM, PP, Carbon Black, ABS 등 4개 제품이 주요 배출원이다.

<표 II-9> 석유화학 제품 생산에 따른 CH₄ 배출 (1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
Carbon Black	2.4	3.6	5.0	5.1	5.1	6.1
Ethylene	1.1	3.7	5.5	5.7	5.9	14.1
SM	1.8	5.5	9.9	10.5	10.2	14.4
EDC	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	6.9
CH ₄ 계	5.3	12.9	20.7	21.5	21.4	11.3

<표 II-10> 석유화학 제품별 NMVOCs 배출 추이 (1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
Acrylonitrile	0.05	0.10	0.36	0.34	0.43	17.6
Carbon Black	8.6	12.9	18.3	18.5	18.6	6.1
Ethylene	1.5	5.2	7.8	8.0	8.3	14.1
Propylene	0.9	3.0	5.0	5.3	5.5	15.3
PA	0.8	1.4	2.2	2.4	2.3	8.3
PP	7.4	19.4	28.3	30.5	32.4	12.0
PS	2.7	4.5	5.6	6.1	6.3	6.6
ABS	5.6	12.7	23.9	29.4	30.9	14.1
LDPE	0.8	2.2	2.5	2.6	2.5	8.8
L-LDPE	0.2	1.0	1.5	1.7	1.6	18.0
HDPE	3.2	7.9	10.7	12.0	12.4	11.0
PVC	4.5	7.6	10.1	10.7	10.7	7.0
SM	8.0	24.6	44.4	47.3	45.7	14.4
NMVOCs 계	44.2	102.5	160.7	174.6	177.5	11.3

그리고 제품생산공정에서 SO₂를 배출하는 것으로 알려진 Carbon Black과 황산(Sulphuric Acid), Titanium Dioxide 등 3개 제품에 대하여 SO₂ 배출량을 추계 하였다.

<표 II-11> 석유화학 제품별 SO₂ 배출 (1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
Carbon Black	0.7	1.0	1.4	1.4	1.4	6.1
Sulphuric Acid	38.4	45.0	58.2	68.6	74.2	5.2
Titanium Dioxide	0.38	0.42	0.40	0.63	0.53	2.6
SO ₂ 계	39.5	46.4	60.0	70.7	76.2	5.2

추계 결과를 보면, 1990년 SO₂가 39.5 천톤에서 2003년 76.2 천톤으로 늘어나 동 기간 중 연평균 5.2%의 증가세를 기록하였다.

그밖에 NO_x, CO의 경우, GL 96에서 동 가스들에 대한 배출계수를 제시하고 있는 제품은 Carbon Black 이다. 이에 국내 Carbon Black 생산량 자료를 기초로 하여 NO_x 및 CO의 배출량을 추계 하였다. 추계 결과를 보면, NO_x가 1990년 0.1 천톤에서 2003년 0.2 천톤으로 증가하였으며, CO는 1990년 2.2 천톤에서 2003년 4.6 천톤으로 증가하였다.

<표 II-12> Carbon Black의 CO, NO_x 배출 (1990~2003)

(단위: 천톤)

	1990	1995	2000	2002	2003	'90-'03 증가율(%)
CO	2.2	3.2	4.6	4.6	4.6	6.1
NO _x	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	6.1

2) 합성가스 생산 및 소비

(가) HFCs, PFCs 및 SF₆의 생산

몬트리올 의정서에서 규제하고 있는 CFC 대체물질인 HCFC-22는 생산과정에서 HFC-23을 부산물 형태로 배출하는 것으로 알려져 있으며, GL 96에서는 HFC-23으로 인한 온실가스 배출량을 추계토록 하고 있다.

따라서 그동안 자료부족으로 감안하지 않았던 동 부문의 온실가스 배출량을 2002년 통계추정 시부터 반영하여 추계하였다. HCFC-22는 1990년대 이전부터 국내생산이 있어왔으므로 이를 반영하고 있다. 동 부문의 2003년 배출량은 1.4 백만tCO₂로 2002년 2.0 백만tCO₂, 2001년 0.6 백만tCO₂ 이었던 점에 비추어 보면 HCFC-22 생산량 변동 폭이 컸던 것으로 보이고 그 결과 추이를 파악하기 어려운 점이 있다.

(나) HFCs, PFCs 및 SF₆의 소비

HFC, PFC 및 SF₆ 등의 가스는 오존파괴물질은 아니나 지구온난화 잠재력이 매우 높기 때문에 GL 96에 배출량 추계방식이 새롭게 추가되었으며, 교토의정서에서 온실

가스로 규정하고 있다.

상기 가스들에 대하여 용도별로 살펴보면, HFCs는 가전제품 및 자동차용 냉매, 발포제 반도체 세정용 등 다양한 용도로 사용되며, 우리나라의 경우 99%이상이 냉매 용도로 소비되고 있다. PFCs는 전자제품, PCB 생산, 도금산업 등에서 세정용도로 사용되며, 우리나라의 경우는 전량 반도체 제조(플라즈마 에칭 및 Chamber Cleaning 공정)에 소비되고 있다. 그리고 SF₆는 중전기기의 절연용도 및 반도체 에칭용도 등으로 사용되며, 우리나라의 경우 80% 이상이 중전기기의 절연용도로 사용되고 있다.

가스 소비로 인한 온실가스 배출량을 가스별로 살펴보면, HFCs가 1996년 2.9 백만 tCO₂에서 2003년 6.3 백만tCO₂로 1996년 이후 연율 11.9%의 증가세를 기록하였다. PFCs는 1996년 1.0 백만tCO₂에서 2003년에는 2.5 백만tCO₂로 동 기간 중 연율 14.5%의 높은 증가세를 보이는 반면 SF₆는 1996년 17.0 백만tCO₂에서 2003년에는 17.4 백만tCO₂로 변화하여 같은 기간 동안 0.3%의 아주 미미한 증가세를 나타냈다.

<표 II-13> HFCs, PFCs, SF₆ 소비에 따른 배출량 추이 (1990~2003)
(단위: 백만tCO₂)

	1995	1996	2000	2002	2003	'96-'03 증가율(%)
HFCs	2.5	2.9	5.1	6.6	6.3	11.9
PFCs	0	1.0	2.3	2.2	2.5	14.5
SF ₆	6.3	17.0	11.7	15.6	17.4	0.3

2. 합성가스별 소비량

본 과제에서 합성가스로 분류하고 있는 HFCs, PFCs, SF₆의 3개 가스는 인위적으로 만들어진 가스로서 PFCs는 반도체 산업의 성장에 맞추어 소비가 늘어나는 특성이 있다 즉 반도체용 맞춤형가스의 역할을 있다는 것이다. SF₆ 가스 역시 중전기기용 개폐기용 용도면에서 특화될 수 있어 기후변화협약으로 인해 온실가스가 규제된다 해도 동 용도의 SF₆ 가스소비는 지속될 것이라 보는 전문가도 있다.

<표 II-14> 특정물질의 용도별 소비량

(단위: 실량톤)

용도	물질명	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
발포	CFC-11	4,598	5,235	4,045	1,851	2,673	3,427	3,268	2,661
	CFC-12	250	75	37	19	18	1	3	7
	HCFC-22	622	684	668	206	161	194	174	244
	HCFC-141	-	559	1,371	2,241	3,694	4,110	4,267	5,115
	HCFC-142	31	128	151	166	257	309	300	270
	소계	5,501	6,681	6,272	4,483	6,803	8,041	8,012	8,297
냉매	CFC-11	507	965	1,155	763	1,865	1,450	914	1,181
	CFC-12	3,636	3,781	3,300	1,958	2,428	2,457	2,315	1,957
	CFC-115	59	60	53	43	48	48	48	44
	HCFC-22	8,751	4,628	5,756	4,016	11,344	13,667	12,269	17,188
	HCFC-123	194	230	372	96	272	339	280	234
	소계	13,147	9,664	10,636	6,876	15,957	17,961	15,826	20,604
세정	CFC-113	1,492	1,391	777	240	381	467	467	397
	1,1,1-TCE	8,491	9,410	6,138	3,332	6,000	5,754	5,930	6,038
	HCFC-141	-	45	126	291	588	654	679	819
	HCFC-225	-	24	8	2	1	1	5	5
	소계	9,983	10,870	7,049	3,865	6,970	6,876	7,081	7,259
분사	CFC-12	71	57	79	42	59	48	37	61
	CFC-114	11	3	3	1	1	1	1	1
	CFC-11	80	5	-	-	-	3	2	2
	HCFC-142	-	3	6	22	48	58	56	50
	소계	162	88	88	65	108	110	96	114
소화(고정)	Halon-1301	295	312	380	170	189	237	187	148
소화(이동)	Halon-1211	150	188	69	88	111	125	120	159
	총계	29,238	27,803	24,494	15,547	30,138	33,350	31,322	36,581

자료: 한국정밀화학공업진흥회 내부자료

몬트리올의정서 이후 CFC계 가스 사용이 제약되면서 대체가스로서 HFCs가 광범위하게 사용되고 있는 것이 최근의 모습인 점을 감안해서 냉매용도에서의 가스 소비에 대해 간략히 살펴보고자 한다. 프레온 냉매는 탄소 결합수에 따라 메탄계와 에탄계로 나뉘는데, 대부분은 메탄계이며, R-113, R-114, R-152a은 에탄계이다. HFCs냉매는 탄소계열이면서 염소를 포함하고 있지 않아 오존층 파괴지수가 거의 없는 것으로 알려져 CFCs, HCFCs 대체 물질로 현재 많은 국가에서 사용 중에 있다. 우리나라도

기존의 CFC 대체 물질로 HFC-134a를 중심으로 사용하고 있다.

이와 함께 프레온 냉매가 개발되기 전 사용하던 자연냉매, 프로판(R-290), 이소부탄(R-600a), CO₂(R-744), 암모니아 등도 현재 프레온 냉매를 대체 할 수 있는 것으로 많은 연구와 함께 실용화가 되고 있다. 특히, 자연냉매는 지구온난화를 야기 시키는 HFCs 냉매의 대안으로도 최적의 냉매로 손꼽히고 있다. 상업적 측면에서 R-11, R-12, R-22, R-502의 대체냉매에 대한 관심이 집중되고 있는데, R-11의 경우 몬트리올의정서가 발의되기 전 R-123이 그 대안으로 개발되었으나, R-123 또한 염소를 포함한 HCFCs계열이므로 현재 R-245fa로 대체되고 있다.

프로판(R-290), 이소부탄(R-600a), 그들의 혼합물 또한 유럽 및 일부 국가에서는 시장이 형성되어 냉장고, 냉동고등에 이미 사용하고 있다. 독일의 경우 1997년 판매된 자국 시장의 모든 냉장고/냉동고는 탄화수소계 냉매를 사용하였다.

R-22의 경우는 R-11, R-12보다는 그 대체 속도가 늦고 있으나, 현재 HFCs계열로 R-134a R-410a등이 그 대안으로 부상하고 있다. 이외 자연냉매인 프로판과 CO₂ 또한 R-22의 대체 냉매로 급부상하고 있다. 이하에서는 가스별로 소비현황을 살펴보고자 한다.

가. HFCs

2000년 발간된 기술표준원 조사보고서에 의하면, HFC는 주로 냉매로 사용되고 있으며, 냉매를 사용하는 분야는 공조기기(37%), 냉장고(36%), 에어컨디셔너(15%) 냉동설비(11%) 순의 사용분포를 나타내었다.

우리나라는 몬트리올 의정서에서 규제되는 CFC 가스를 아직 냉매로 사용할 수 있기 때문에 HCFC, HFC와 함께 사용되고 있다. 1999년 조사에 의하면 전체 냉매 소비량의 29% 정도가 HFC-134a 이었다. 우리나라는 아직 HFCs 소비량에 대한 정보를 가지고 있지 못하여 향후 기후변화협약 대응 정책 수립 시 걸림돌로 작용할 것이 우려된다.

냉매 소비량 가운데 자동차 에어컨디셔너용 냉매로는 주로 HFC-134a가 사용되며, 2004년 소비량은 약 2,430톤 정도이다. 일반 에어컨디셔너 용도로는 아직 R-22가 주로 사용되나 국내용 가정용 에어컨디셔너, 김치냉장고, 소형냉장/냉동고 등은 이미 HFC-134s를 사용하는 것으로 추정된다. 반면에 수출용은 수출시장에서의 규제에 맞추어야 하는 제약이 있으므로 일반적으로 가정용 냉장고 수출모델에는 R-600a(이소부탄 자연냉매)를 사용하고 있다. 수출용 자동차는 국내 시판용과 마찬가지로 HFC-134a를 냉매로 사용하고 있으나 유럽시장을 중심으로 HFC-134a의 사용을 제한하려는 움직임이 있어 HFC-134a의 대체 냉매로써 GWP가 HFC-134a의 11%에 지나지 않는 HFC-152a를 대상으로 연구·개발 중에 있다.

<표 II-15> 주요 R-400 류와 R-500류의 냉매종류별 특성

가스명	가스 특성 및 혼합비율
R-507	저온, 중온 상업용 냉장냉동시스템에서 R 502 대체품, HFC-125와 HFC-143a가 50%씩 혼합된 물질
R-410A	이 냉매는 HFC-32 (50%)와 HFC-125(50%)의 혼합물임. R-22 대체품으로 에어컨디셔너, 냉동/냉장시스템
R-409A	이 냉매는 HCFC-22 (60%)와 HFC-142b(15%), HCFC-124(25%)의 혼합물임. HCFC
R-408A	이 냉매는 CFC-22 (47%)와 HFC-125(7%), HFC-143a(46%)의 혼합물임. R-22 대체품으로
R-407A	HFC-32, HFC-125, HFC-134a가 wt% 기준으로 각각 20%, 40%, 40%혼합된 냉매.
R-407C	HFC-32, HFC-125, HFC-134a가 wt% 기준으로 각각 23%, 25%, 52%혼합된 냉매. R-22대체품
R-404A	HFC-143a(52%), HFC-125(44%), HFC-134a(4%)

자료: ATOFINA Chemicals Inc.의 가스 특성 자료

필수적 용도로 분류되는 HFC 소비로 MDI (전량흡입기)를 들 수 있는데 MDI에서는 천식용 치료제의 발사체 즉 에어로졸 용도로 HFC-134a를 사용하고 있다. MDI용도로 사용되는 HFC-134a는 연간 약 5톤 정도인 것으로 추산된다.

한편 건물의 공조기기에서 사용되는 냉매는 아직 R-11, R-123이 주종을 이루며 일부에서 HFC-134a를 사용하는 것으로 판단된다. 또한 상업용 냉장 쇼케이스와 같은 냉동설비용으로는 R-22가 주로 사용되며, 냉동/냉장트럭(냉동/냉장탑차)용 냉매로는 CFC- 115가 주로 사용되고 있다.

HFCs는 거의 대부분 수입에 의존하고 있으며, 수입업체 리스트는 <표 II-18>과 같다. 국내 chemical 생산업체인 울산화학에서는 HFC-32, HFC-116, HFC-218을 생산하며, PFC 계열로 NF₃를 생산하고 있다.

<표 II-16> HFCs 수입량 추이

(단위: kg)

	HFC-152a	HFC-134a	HFC-404a
	2903-30-5000	2903-30-6000	2903-45-3090
1994	1,260	1,208,253	-
1995	640	1,904,013	-
1996	65	2,223,393	13,652
1997	13,401	2,935,504	2,000
1998	-	2,212,873	5
1999	31,692	3,330,972	-
2000	217,857	3,898,803	-
2001	107,812	4,014,871	-
2002	356,562	5,008,577	320
2003	332,982	4,856,621	1,267

자료: 관세청, 수입통계 연보, 각 호

HFCs 수입추이를 보면, 주로 HFC-134a가 수입되고 있으며, 1994년 1,208톤에서 2003년 4,857톤으로 늘어나 동 기간 중 연평균 16.7%의 매우 급격한 신장세를 기록하였다.

<표 II-17> 냉매 종류 및 업체의 구매량 (2004)

가스종류	구매량 (kg)	비고
R-507	1,456	
R-502	4,040	
R-410A	106,000	
R-409A	500	HCFC
R-408A	654	
R-407C	1,062	
R-407A	9,052	
R-404A	15,068	
R-290	300	자연냉매
R-23	510	HCFC
R-22	16,533	HCFC
R-12	18,596	CFC
K-22	6,000	HCFC
HFC-152a	34,000	
HFC-134a	2,996,593	

자료: 에너지관리공단 실사결과, 2005

<표 II-18> HFCs 종류별 수입업체 리스트 (2004년말 기준)

HFC 종류	HS-No.	수입업체명
HFC-152a	2903-30-5000	후성물산(주)
		(주)삼광가스텍 유한회사 듀폰 삼성토탈(주) (주)세원종합상사 한강화학(주)
HFC-134a	2903-30-6000	후성물산(주)
		한강화학(주)
		(주)화인텍
		유한회사 듀폰
		(주)PSG
		(주)삼광가스텍
		대광화학(주) 스카이모델(주) 연경전자(주)

<표 II-19> 기존 냉매와 대체 가능 냉매

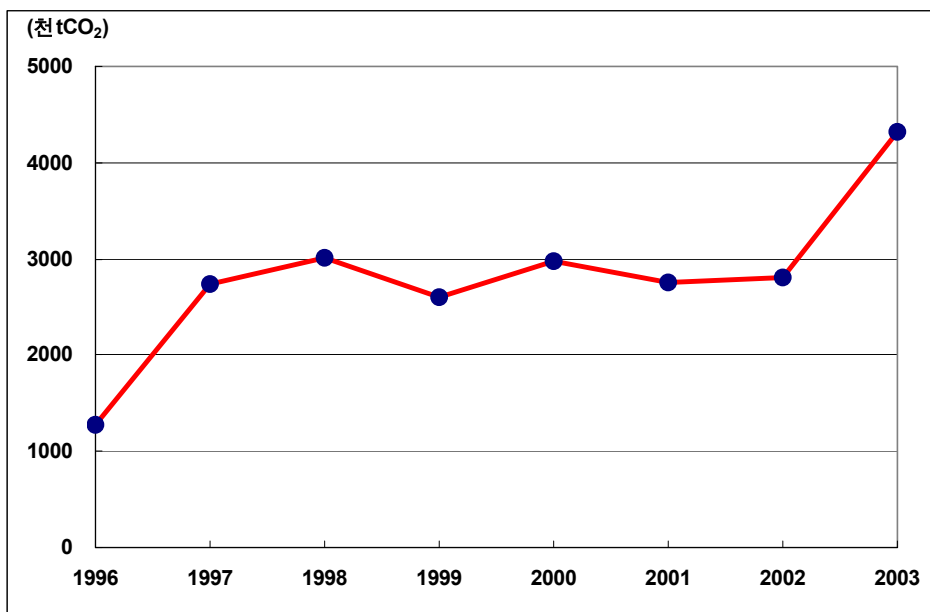
기존의 CFC, HCFC냉매	대체 가능한 냉매
R-113	
R-11	R-123, R245a
R-114	R-236fa
R-12	R-134a, R-600a, R-260/600a DME, R-717, R-744
R-500 (R-12/152a,73.8/26.2)	R-134a
R-22	R-22 E-134a R-407C (R-32/125/134A,23/25/52) R-410A (R-32/125,50/50) R-290, R-717, R-744
R-502a (R-22/115,48.8/51.2)	R-404A (R-125/143a/134a,44/52/4) R-507 (R-125/143a,50/50)
R-13B1	R-404A (R-32/125,50/50)
R-13	R-23
R-503 (R-23/13, 40.1/59.9)	R-508B (R-23/116,39/61)

나. PFCs

반도체나 LCD같은 display 소재 제조공정으로부터의 배출가스 중에는 식각 (etching) 및 증착(CVD) 공정에 사용되는 합불소 화합물인 PFC (Perfluorocarbon)가 차지하는 비중이 크며, 높은 안전성 및 매우 큰 지구온난화 지수로 인하여 환경적 문제가 되고 있다.

반도체 제조공정에서 발생하는 환경 유해물질을 반도체 제조공정과 연관시켜 배출 물질을 분석하면 <표 II-20>과 같이 나타낼 수 있다. <표 II-20>에서 보는 바와 같이 Lithography, Etch, Wet Station, Deposition, Diffusion & Ion Implantation, Planarization, Packaging공정의 8가지로 분류할 수 있다. 각 제조공정에서 나오는 환경 유해 물질을 분류하여 보면 PFC, VOC, 폐수, 세정, 폐기물 및 CMP Slurry, 유해 Chemical 및 가스, 에너지절감의 7개 분야로 대별된다. 특히 반도체공정에서 solvent 를 다량 사용하므로 인하여 발생하는 휘발성을 지닌 유기화합물인 VOC는 대기 중으

로 방출됨으로써 질소산화물과 반응하고 오존(O₃)층을 생성하게 됨으로써 환경 및 인체에 유해한 영향을 주게 된다. 반도체 공정에서는 주로 Lithography공정에서 VOC가 다량 발생하게 되며, 감광제 및 관련 솔벤트도 VOC물질을 발생시키는 주원인이 되고 Wet station공정에서도 IPA를 vapor dry하는 과정에서도 VOC가 상당량 발생하고 있다⁴⁾.



[그림 II-1] PFCs 소비로 인한 온실가스 배출량

반도체의 제조 공정에서 폐수가 가장 많이 배출되는 공정으로는 wet station과 planarization 공정이며 성상에 따라 불산폐수, 산폐수, 그리고 유기용제폐수로 구분하여 처리를 하고 있다. 반도체 제조 공정에 사용되는 용수는 초순수임에도 불구하고 공정에서 사용되는 다양한 유해 화학물질과 함께 사용되고, 식각(etching)과 같은 공정을 거치면서 입자성 물질을 함유하고 있기 때문에 발생하는 폐수의 종류는 다양하다. 따라서 이러한 물질을 함유하고 배출되는 폐수는 방류하기 전에 반드시 안전하게 처리되어야만 하고 가능하면 재 사용하여 전체 용수의 사용을 저감하여야 한

4) 허완수, 반도체 환경기술의 국내의 최근동향

다. 한 예로 국내의 한 업체의 경우에는 취수량의 약 60%가 폐수로 발생되며 발생된 폐수를 처리하는 비용이 1,230원/톤이며, 이 중 약 60%가 약품비용으로 지출되고 있다.

<표 II-20> 반도체 제조공정과 발생물질

공정명	주요 공정	발생물질
Lithography	P/R 도포, 노광, 현상	VOC계 (P/R, HMDS, Thinner, Developer)
Etch	Oxide, Nitride, Poly, Metal	PFC계, Chloride계(Cl ₂ , BCl ₃), HBr
Wet Station	Wet Etch, Water 세척 Part 세척	VOC계 (IPA, Acetone) 산류 (불산, 황산), 솔벤트류, 폐수
Deposition	LP CVD, PE CVD CVD(Metal), PVD	PFC계, Silane계, Fluoride계, Copper Rigand
Diffusion & Ion Implant	Thermal Oxide, Anneal Ion Doping	Hydride계(NH ₃ , PH ₃ , AsH ₃)
Planarization	CMP, SOG	CMP Slurry, Metal Slurry, VOC계, 폐수
Package	Soldering, Molding	Solder Solution, 폐산, EMC

자료: 허완수, 반도체환경기술의 국내외 최근동향

<표 II-21> 공정별 배출 PFCs 기체

공정	PFC 종류
Si 식각	CF ₄ , SF ₆ , NF ₆
SiO ₂ 식각	CHF ₃ , CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈
CVD	C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , NF ₃

자료: 현대환경연구소, 환경 VIP Report 제46호

<표 II-22> 반도체 및 LCD 공정용 구매량 기준 PFCs 비교

(단위: kg)

	기존자료 (A)	조사자료 (B)	차이 (A-B)
CF ₄	119,402	158,027	-38,625
C ₂ F ₆	159,122	178,350	-19,228
C ₃ F ₈	207,097	268,094	-60,997
C ₄ F ₈	11,220	12,993	-1,773
CHF ₃	24,991	31,631	-6,640
SF ₆	168,778	78,601	90,177
NF ₃	435,008	378,313	56,695

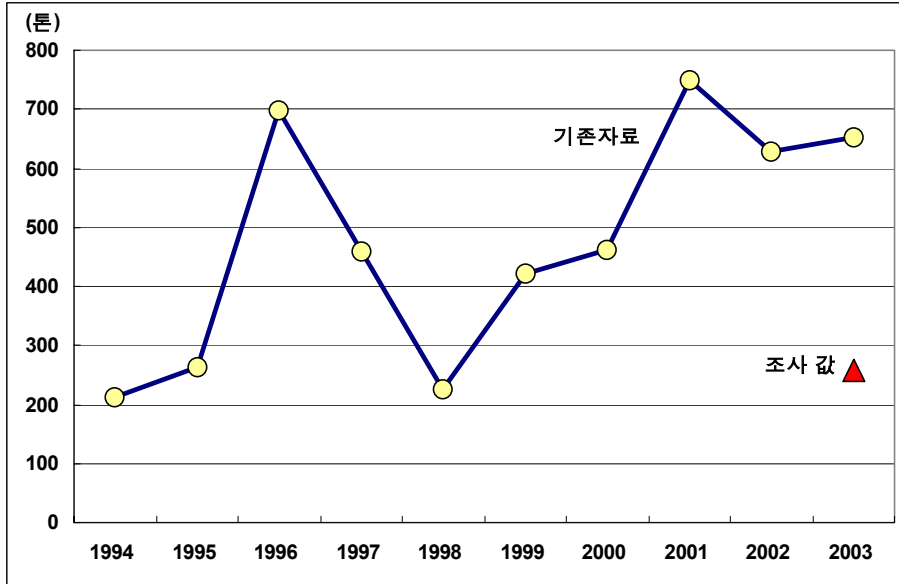
주: 조사자료는 2005 에너지관리공단 조사결과를 의미하며 기존자료는 반도체협회를 통해 받은 자료임.

다. SF₆

육불화황 (SF₆)은 전기 전송과 배전에 사용되는 전기 절연체, arc quenching, 전류 차단장비에 사용되고 있다. 전기 장치에 사용된 SF₆ 가스는 고압 가스-절연 전송선과 다른 장치에 일부 사용되기도 하지만 대부분 가스 차단개폐기(GIS)와 회로 차단기에 사용되고 있다. 일반적으로 중전기기 장치로부터의 SF₆ 배출량은 합성가스 배출량 중 큰 부분을 점유한다.

중전기기용 SF₆ 가스 소비량은 연간 600톤이 넘는 양으로 전력산업이 급속히 팽창하면서 전력 안전분야를 담당하는 차단기 수요 증가에 힘입어 그 동안 급속한 증가세를 나타냈다.

2003년 소비기준으로 SF₆ 가스의 약 80% 정도를 중전기기용으로 소비하였으며, 나머지는 반도체와 TFT-LCD 제조용으로 사용하였다. 향후 당분간은 중전기기용 SF₆ 가스 소비가 지속될 것이라는 것이 전문가의 견해라는 점을 감안할 때 동 용도에서의 SF₆ 가스 소비, 회수 등에 관한 자료수집 절차를 보다 강화할 필요가 있겠다.



[그림 II-2] 증전기기용 SF₆ 소비량

3. 합성가스별 소비량 조사 네트워크 대안

가. HFCs

1) 오존층파괴물질 (ODS) 대체에 대한 일반적 문제

(가) 방법론의 선택

GL 96에서는 ODS 대체물질의 사용으로 인한 배출량 추정을 위한 방법론을 advanced 또는 실제 방법론 (Tier 2)과 기본 또는 잠재적 방법론 (Tier 1)의 두 가지를 제시하고 있다. Tier 2 방법론은 소비량과 ODS 대체물에서의 배출량 사이의 time lag를 설명하고 있는데 반해 Tier 1은 화학제품이 생산되거나 특히 최종 소비 부문에 판매된 해에 배출이 일어나는 것을 가정하고 있다.

동 부문에서의 방법론 관련 모범사례는 Tier 2 방법론을 적용하는 것이다. 또한 GPG⁵⁾에서는 이 부문에 Tier 2 방법의 다양성을 다루고 있으면서 각 하위 부문에서

이런 방법을 어떻게 적용할 것인지에 대해 논의하고, 존재하는 자료를 검토하고 그것의 차이를 확인하고 있다.

GPG에서 제시하고 있는 Tier 2 방법론은 Tier 2a (상향식 접근법)와 Tier 2b (하향식 접근법)으로 동 부문 배출량이 국가 온실가스 인벤토리에서 중요한 비중을 점한다면 Tier 2 방법론을 취해야 하며, 이 경우에 인벤토리 작성기관에서는 여러 가지 여건을 감안하여 Tier 2a와 Tier 2b 가운데 어느 방법론은 채택할 것인지를 결정하여야 한다. 상향식 접근법은 배출계수를 통하여 명백하게 소비량과 배출량 사이의 time lag를 고려하고 있으며, 하향식 접근법은 대기 중에 방출되었던 오존층파괴물질을 대체하기 위해 주어진 해에 소비된 virgin chemical 양의 추적을 통해 사실상의 time lag를 고려하고 있다.

Tier 2a (상향식 접근법)의 일반식은 식 (1), Tier 2b (하향식 접근법)의 일반식은 식 (2)⁶⁾와 같다.

$$\begin{aligned} \text{각각의 HFCs (혹은 PFCs)에 대한 총배출량} = \\ \text{조립 시 배출량} + \text{기기 운용 시 배출량} \\ + \text{기기 폐기 시 배출량} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{배출량} = \text{연간 신규 가스 판매량} - \\ [\text{신규 장비에 대한 충전량} - \text{폐기 장비의 본래 총 충전량}] \end{aligned} \quad (2)$$

(나) 활동자료의 선택

Tier 2a 접근법 (상향식 접근법) 은 기존의 단위에서의 HFCs(/PFCs)에 대한 통계 자료를 필요로 한다. 일부 배출통계 인벤토리 작성기관에서는 기술 보고서 등에서 발표된 국가자료에 접근할 수 있을 것이나 기존의 단위나 화학제품에 대한 통계자료를 평가하는 연구도 필요할 것으로 보인다. 이 경우에 전문가 패널의 도움을 통해

5) IPCC, 2000, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

6) 경계조건 : 만약 총 장치 충전량에 순변화가 없다면, 연간 판매량은 배출량과 같음. 만약 총 장치 충전량의 순변화가 연간 판매량과 동일하다면 배출량은 0(zero)임.

정보의 생성을 용이하게 할 수 있을 것이다. 배출통계 작성기관에서는 인벤토리 갱신을 위해 매년 연구를 결정할 수도 있다.

Tier 2b 접근법 (하향식 접근법)에 대한 activity 자료는 배출원 보다는 화학제품의 배치(공급)에 초점을 맞추고 있다. 판매량 기준의 접근법에 있어 국가 화학제품 사용에 관한 자료가 배출의 원인이 되는 장치에 대한 국가 통계자료를 구하기 보다 더 쉬울 것이다. 동 접근법에 대한 모범사례는 가스 생산자와 구입자로부터의 연간 총 판매량에 관한 자료를 얻는 것이다⁷⁾.

2) 에어로졸 용도

(가) 방법론의 선택

대부분의 aerosol package는 추진체로서 탄화수소 (HC)를 포함하지만, 아주 낮은 비율로 HFCs와 PFCs가 추진체로 사용될 수 있다. aerosol에서의 배출량은 대체로 생산 후 짧은 기간 뒤에 일어나는데 평균적으로 판매 뒤 6개월 시점에 에어로졸 패키지 안에 있는 추진체는 전량 배출된다. 에어로졸 패키지의 주요 5대 배출원은 아래와 같다.

- ① 정량 흡입기 (Metered Dose Inhalers, MDIs)
- ② 개인 용품들 (예를 들면 모발용품, deodorant, 면도용 거품크림)
- ③ 가정용품 (예를 들면 air-fresheners, oven과 fabric cleaners) :
- ④ 산업용품 (예를 들면 special cleaning spray, 윤활제, pipe-freezers) :
- ⑤ 다른 일반용품(예를 들면 silly string, tire inflators, claxons).

현재 위에서와 같은 용품들의 추진체로 사용되는 HFCs는 HFC-134a, HFC-227ea, HFC-152a이다. HFC-43-10mee와 PFCs 등은 산업용 에어로졸 제품에 용제로 사용되고 있다⁸⁾. aerosol 배출량은 'prompt'로 여겨지는데 이는 판매된 후 1-2년 사이에 초

7) GL 96 Vol. 3. 2.17.3.3 부분의 Tier 1b방법론에서 연간 판매량 자료에 대한 기본방법론을 제시하고 있음.

8) HFC-43-10mee는 오직 용제로만 사용되고 있지만, aerosol canisters를 통해 유통되는 경우 aerosol로 취급됨.

기에 충전된 모든 양이 다 배출되기 때문이다. 그러므로 배출량을 측정하기 위해서는 판매 이전에 생산품 컨테이너에 초기 충전된 aerosol 양을 알 필요가 있다. GL 96에 의하면, t년도의 에어로졸 배출량은 다음 식에 따라 산정할 수 있다.

$$t\text{년도의 HFCs 배출량} = \begin{aligned} & [(t\text{년에 판매된 에어로졸 제품에 포함된 HFCs와 PFCs의 양}) \\ & \times (\text{EF})] + [(t-1)\text{년에 판매된 에어로졸 제품에 포함된 HFCs와} \\ & \text{PFCs의 양}] \times (1 - \text{EF}) \end{aligned} \quad (3)$$

이 식은 각각의 chemical에 개별적으로 적용되어야 하며, 총 탄소-equivalent 배출량은 각 chemical의 탄소 equivalent 배출량의 합계와 동일하다.

(나) 활동자료의 선택

필요한 활동자료는 국가에서 소비된 모든 에어로졸 제품에 포함된 각각의 관련 화학제품 총량에 관한 자료이다. 물론 수입과 국내 판매로 구분되어야 한다.

이런 하위 부문 최종소비자에 대한 activity 자료는 상향식 또는 하향식 접근법을 사용하여 수집될 수 있다. 상향식 접근법은 판매되고 수입된 aerosol 생산품(예를 들면 개별 정량흡입기 수, 모발용품, 그리고 tire inflators)의 수와 컨테이너당 평균 충전량에 관한 자료를 필요로 한다. 많은 경우 상향식과 하향식 자료의 혼합이 필요할 수도 있다.

3) 용제 용도

(가) 방법론의 선택

용제용도로 HFCs와 PFCs가 주로 사용되는 분야는 다음과 같다.

- ① 정밀 세정 (Precision Cleaning)
- ② 전자 세정 (Electronics Cleaning)
- ③ 금속 세정 (Metal Cleaning)
- ④ Deposition application.

용제로서 HFCs의 사용은 아직 걸음마 단계이다. 사용되어 왔거나 사용될 수 있는

용제에는 HFC43-10mee, PFC-51-14 그리고 HFC-365mfc 등 이다.

aerosol 부문의 경우처럼 용제 application에서의 배출량 역시 일반적으로 ‘prompt’ 배출량으로 여겨지고 있는데 그 이유는 화합물이 2년 내에 전량 배출되기 때문이다. 그러므로 배출량을 측정하기 위해서는 매년 팔린 용제용도의 chemical 총량에 대해 알 필요가 있다. t년도의 용제용도의 HFCs와 PFCs 배출량은 다음 식과 같이 산출될 수 있다.

$$t\text{년도 배출량} = [(t\text{년도 용제 판매량}) \times (EF)] + [((t-1)\text{년도 용제 판매량}) \times (1 - EF)] \quad (4)$$

(나) 활동자료의 선택

최종 소비 관련 활동자료는 특정 연도에 용제로서 팔린 각각의 관련 chemical의 양과 동일하다. aerosol과 함께 국내 용제와 수입된 용제의 양에 관한 자료가 수집되어야 한다. 필요한 자료는 하향식 또는 상향식 방법을 사용하여 수집될 수 있고 국가 용제 산업특성의 영향을 받는다. 대부분의 국가에서 최종 소비자는 매우 다양하고 하향식 접근법을 사용하는 것이 실제적인 방법이다.

하향식 자료는 국가에서 연간 판매되거나 수입된 용제의 양과 동일하다. 수입된 용제에 관한 자료는 대체적으로 관세청의 수입 통계자료 혹은 용제 수입·유통업자로부터 얻을 수 있다.

4) Foam 용도

(가) 방법론의 선택

일반적으로 HFCs는 insulating, cushioning, packaging과 같은 foam 응용분야에서 CFCs와 HCFCs 대체물로의 사용량이 점차 늘어나는 추세이다. 동 용도로 사용될 수 있는 화합물은 HFC-245fa, HFC-365mfc, HFC-134a, 그리고 HFC-152a이다. Open-cell foam의 경우 blowing agent로 사용하는 HFCs 배출량은 생산 공정 시 발생할 것으로 판단되고 closed-cell foam의 경우 배출은 오랜 기간에 걸쳐 발생된다(예를 들면 20년).

GL 96에서는 open cell foam과 closed cell foam 각각의 경우에 대해 배출량 산출 방법을 제시하고 있다.

$$\text{open-cell foam에서의 배출량} = \frac{\text{open-cell foam 제조시 사용된 HFCs and PFCs 총량}}{\quad} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\text{Closed-cell foam에서의 배출량} \\ &= [(t\text{-년도 신규 closed-cell foam 제조에 사용된 연간 HFCs 와 PFCs 총량}) \\ &\quad \times (\text{첫년도 손실 배출계수})] + [(t\text{-년과 } t-n\text{년 사이에 closed-cell foam} \\ &\quad \text{제조시 투입된 본래의 HFCs와 PFCs 량}) \\ &\quad \times (\text{연간 손실 배출계수})] + [(n\text{-년간 Decommissioning 손실}) \\ &\quad - (\text{파괴된 HFCs 또는 PFCs})] \end{aligned} \quad (6)$$

n = closed-cell foam의 생산품 주기

Decommissioning 손실 : losses equipment가 scrape 될 때, 서비스 주기 끝에 남아 있는 chemical

(나) 활동자료의 선택

두 종류의 활동자료가 배출량 추정을 위하여 필요하다. 하나는 foam 생산 시 사용된 국가의 chemical 양이며, 다음으로는 국가에서 사용된 foam에 포함된 chemical의 양에 대한 자료이다. 이들 영역과 관련된 자료 수집 문제는 서로 상이하다.

Foam 생산에 사용된 Chemical은 foam 산업에 판매된 chemical 판매 자료를 국내 생산 판매업자 혹은 수입유통업자 등으로부터 얻어 활용할 수도 있으며, 전량 수입의 경우이고 동시에 별도의 세 번을 갖는다면 관세청 자료에서도 정보를 구할 수 있을 것이다.

5) 고정식 냉각장비 용도

(가) 방법론의 선택

고정식 냉장/냉동장비 (냉각장비)와 에어컨디셔너용 CFCs와 HCFCs의 대체물질로 HFCs와 PFCs가 사용되고 있다. 냉각장비에는 주거용 냉장고, 매장용 냉각기, 가정·

상업용 에어컨디셔너, 냉장창고 등을 포함한다.

GL 96에서 제시하고 있는 Tier 2 방법론은 고정식 냉각장비의 조립, 가동, 폐기과정에서의 배출량 산출에 기초하고 있다. 일반식은 다음과 같다.

$$\text{총배출량} = \text{조립단계 배출량} + \text{가동단계 배출량} + \text{폐기단계 배출량} \quad (7)$$

동 배출량 관련 모범사례는 연간 냉매 판매량을 사용하는 하향식 Tier 2 방법론을 적용하는 것이다. 대안적 방법론은 장치에 대한 자료와 다수의 배출계수를 사용하는 상향식 방법으로 보다 많은 자료를 필요로 하나 정확성 개선을 기대할 것 같지 않아 보인다. 하지만 국가 여건에 따라서는 아직 동 방법론이 모범사례가 되고 있다. 다음 식은 하향식 접근법의 기본식이다.

$$\text{배출량} = [\text{새로운 냉각제의 연간 판매량}] - [\text{새로운 장치에의 총충진량}] + [\text{폐기장치의 본래 총충진량}] - [\text{국제적으로 파괴된 양}] \quad (8)$$

Tier 2 상향식 접근법에서는 각 단계별로 별도의 추정식을 제시하고 있으며 각 단계별 기본식은 다음과 같다.

$$\text{조립단계 배출량} = (\text{t년도 충전된 HFCs와 PFCs 총량}) \times (k/100) \quad (9)$$

k = 초기 충전량 중 조립단계 배출량 비율을 나타내는 배출계수

$$\text{운영단계 배출량} = (\text{t년도 HFCs와 PFCs 스톡 양}) \times (x/100) \quad (10)$$

x = 총 충전량 중 연간 누출율

$$\text{폐기단계 배출량} = (\text{t-n년간 충전된 HFCs와 PFCs 양}) \times (y/100) \times (1-z/100) - (\text{국제적으로 파괴된 양}) \quad (11)$$

y = 초기 충전량 대비 폐기 시 장치에 남아 있는 비율

z = 폐기 시 회수효율

(나) 활동자료의 선택

하향식 접근법 기준으로 살펴보면, 냉각용 냉매를 생산하는 국가의 인벤토리 작성

기관은 냉매 생산자로부터 얻은 정보를 사용하여 새로운 냉매의 연간 판매량을 추정하여야 한다. 수입 냉매에 관한 자료는 관세청 통계자료, 수입업자 또는 유통업자로부터 수집할 수 있다.

6) 이동용 에어컨디셔너 용도

(가) 방법론의 선택

세계적으로 자동차 산업에서는 1995년 이후부터 신규 차량의 이동용 에어컨디셔너(MAC)을 위해 HFC-134a를 사용해 왔다. MAC는 승용차, 트럭, 기차, tram과 버스의 승객들을 시원하게 해주는 물론 일부 냉동/냉장 트럭의 경우는 HFC-134a를 냉매로 사용하여 트럭 내 화물을 냉장 혹은 냉동 상태로 운반한다.

과거의 이동용 에어컨디셔너 시스템은 냉기 서비스 제공 중에 대기에 냉각제를 방출하였다. 그러나 새로운 시스템은 냉기 공급중 냉매의 회수/재사용 프로그램을 이행함으로써 냉매 보충 필요를 많이 감소할 수 있다.

동 용도에서의 모범사례는 국가 상황에 좌우되는데 일반적으로 적용 가능한 모든 유형의 냉각기와 에어컨디셔너의 배출량 추정을 위한 Tier 2 접근법의 일반식은 다음과 같다⁹⁾.

$$\text{HFC-134a 연간 배출량} = \text{'초기충진' 배출량} + \text{가동단계 배출량} + \text{폐기단계 배출량} - \text{국제적으로 파괴된 양} \quad (12)$$

하향식 Tier 2 접근법은 가장 정확한 방법으로써 이는 자료 의존도가 상대적으로 낮고 보다 확실하면서 신뢰할 만한 자료를 사용하며 보다 적은 가정을 필요로 하기 때문이다. 하향식 접근법은 다음의 3가지 식으로 구성된다.

$$\text{초기충진 배출량} = (\text{EF}) \times (\text{새로운 MAC 에 대한 초기충진용 연간 신규 HFC-134a 양}) \quad (13)$$

9) 동 용도에서의 '초기충진' 배출량은 고정용 냉각기기 용도에서의 '조립단계'배출량과 동일함.

$$\text{운영단계 배출량} = (\text{MACs 산업에 판매된 연간 신규 HFC-134a 총량}) - (\text{새로운 MAC의 초기충진을 위한 연간 신규 HFC-134a 총량}) \quad (14)$$

$$\text{폐기단계 배출량} = [(\text{HFC-134a를 사용하는 자동차 에어컨디셔너 폐기율}) \times (\text{HFC-134a를 사용하는 MACs 탑재 차량수}) \times (\text{차량당 평균 HFC-134a 충전량})] - \text{파괴된 양} \quad (15)$$

상향식 Tier 2 방법론의 배출량 추정식은 다음과 같다.

$$\text{초기충진 배출량} = (\text{t년도 충전된 총 HFC-134a 양}) \times (\text{k}/100) \quad (16)$$

$$\text{운영단계 배출량} = (\text{t년도 HFC-134a 스톡}) \times (\text{x}/100) \quad (17)$$

$$\text{폐기단계 배출량} = (\text{t-n년동안 충전된 HFC-134a 양}) \times (\text{y}/100) \times (1 - \text{z}/100) \quad (18)$$

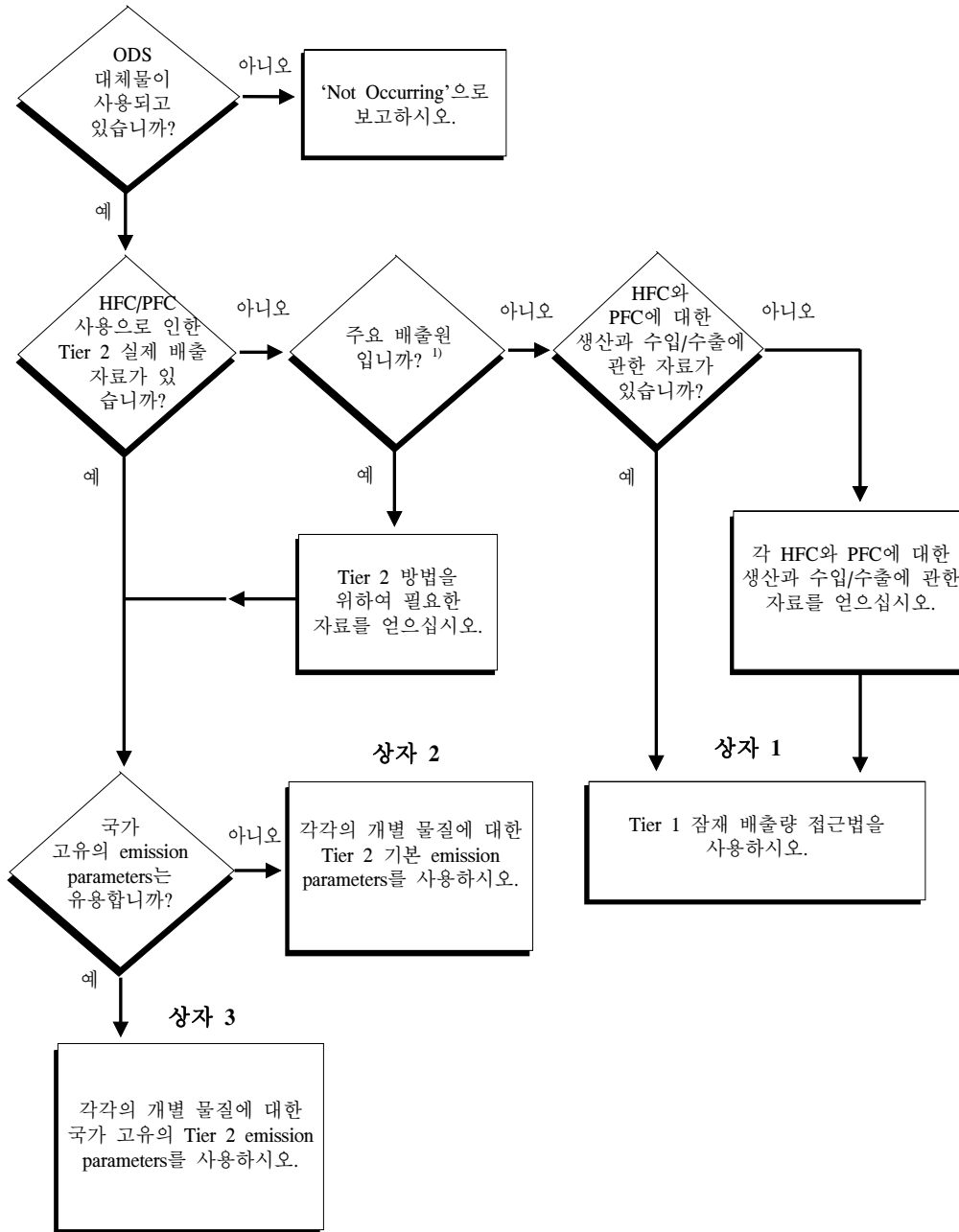
(나) 활동자료의 선택

하향식 접근법 하에서 활동자료는 MAC 산업에 팔린 HFC-134a 양, 초기충진 시 사용된 양, 폐차된 차량에서의 HFC-134a 양을 결정하기 위해 필요한 변수, 파괴된 HFC-134a 양을 포함하고 있다. 각각의 기간과 관련된 자료 수집 문제는 아래에 논의 되어 있다.

<표 II-23> 하향식 접근법을 위한 IPCC 기본 값

하향식 배출량 변수	기본값
HFC-134a의 평균 충전량	0.08 kg/차량 (승용차) 1.2 kg/차량 (경트럭)
차량 폐차 비율	8%
새로운 차량의 '초기충진 시' 배출된 냉매	EF=평균 시스템 충전량의 0.5%

자료: Atkinson과 Baker(1999).



[그림 11-3] 오존파괴물질 (ODS) 대용의 모든 대체물질에 대한 일반적인 결정도

상향식 접근법은 연간 충전된 HFC-134a의 양, 연간 모든 MACs에 대한 HFC-134a stock, MACs 수명기간 말기에 남아 있는 양에 관한 자료를 필요로 한다.

7) 소비량 조사 대안

HFCs 배출량 산정방식을 현재 적용하고 있는 기존방식에 비해 개선시키기 위해서는 관련 기초자료를 여하히 수집하는가에 달려있다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 HFCs는 다양한 용도로 사용되며 사용 용도별로 특징을 갖고 있어 용도별로 나누어 살펴보기로 한다.

우선 에어로졸 용도로 HFCs를 사용하는 경우를 보면, 우리나라에서 HFCs를 에어로졸 용도로 사용하는 대표적인 케이스는 의료용으로 사용되는 정량흡입제이다. 정량 흡입제의 추진체 (propellent)로 HFC-134a를 사용하고 있다. MDI는 제약업체인 한국베링거인겔하임¹⁰⁾과 글락소스미스클라인 코리아¹¹⁾에서 판매하고 있다. MDI 이외에 분사용으로 사용되는 CFC 혹은 CFC 대체물질은 미미할 것으로 예상된다. 1999년 한국정밀화학공업진흥회 조사보고서에 의하면 1999년 현재 분사용으로 사용되는 CFC 양은 현저히 감소하여 향후 대체물질의 사용도 전무할 것으로 예상하고 있다. 그리고 최근 한국정밀화학공업진흥회 담당자 인터뷰에서도 분사용 HFCs 소비는 MDI가 유일한 것으로 파악되었다. 따라서 MDI용 HFCs 소비량은 앞에서 언급한 제약사 (2개업체)를 통해 국내에 판매된 약제의 양과 단위 약제당 함유된 HFC 양을 파악하는 것이 바람직한 방법일 것이다.

다음으로 용제용도와 foam 용도로 사용되는 HFCs 양을 추정하는 것인데 1999년에 세정제 용도로 HFC-134a가 5.5톤(전체 세정제의 0.3%, 1999년 HFCs 수입량의 0.2%) 사용되었으며, 발포제로는 7.9톤(전체 발포제의 0.08%, 1999년 HFCs 수입량의 0.2%)을 사용한 바 있다. 현재 foam용도와 세정제 용도 HFCs 소비량은 파악이 어려우므로 수입업자의 도움을 받아 자료를 구하는 방법이 가장 효율적이라 판단된다.

10) http://www.boehringer-ingelheim.co.kr/company/introduce_kr.htm

11) http://www.gskkorea.co.kr/company/company_02.asp

다음으로 자동차용 에어컨디셔너 용도로 사용되는 HFCs 양을 추정하기 위한 대안을 보면, 가장 정밀한 방법으로는 자동차에 납품하는 냉매량을 수입업자에게서 확인하고 자동차 제작 시 에어컨디셔너에 주입되는 양을 자동차 제작사를 통해 파악하는 것이다. 차선책으로는 자동차 생산량 자료와 IPCC 평균 계수를 이용하여 배출량을 추정하는 방법일 것이다.

마지막으로 냉매용도로 사용되는 HFCs 소비량을 추정하기 위한 대안을 제시하고자 한다. 우선 국내용 냉매이용 기기에는 대부분이 HFC-134a를 사용하고 있다. 고정식 에어컨디셔너는 아직 R-22를 사용하고 있으며, 수출용 가정용 냉각기기는 자연냉매(R-600a)를 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 그리고 상업용 냉동설비 역시 R-22를 냉동탑차에는 CFC-115를 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 그러므로 냉매용 HFCs 소비량은 앞에서 언급한 냉각기기 몇 가지를 제외한 나머지 전체에 대해 추산하면 될 것이다.

동 용도의 HFCs 배출량 추정을 위해 비교적 정밀한 방법은 가전기기 (혹은 냉동/냉장기기) 제조사의 협조와 HFCs 수입업자의 도움을 통하는 것이며, 정밀도는 조금 낮지만 비교적 용이하게 추산하는 방법은 생산대수에 대당 평균 냉매 충전량을 곱해서 잠재적 배출량을 산정하는 방법일 것이다.

나. PFCs

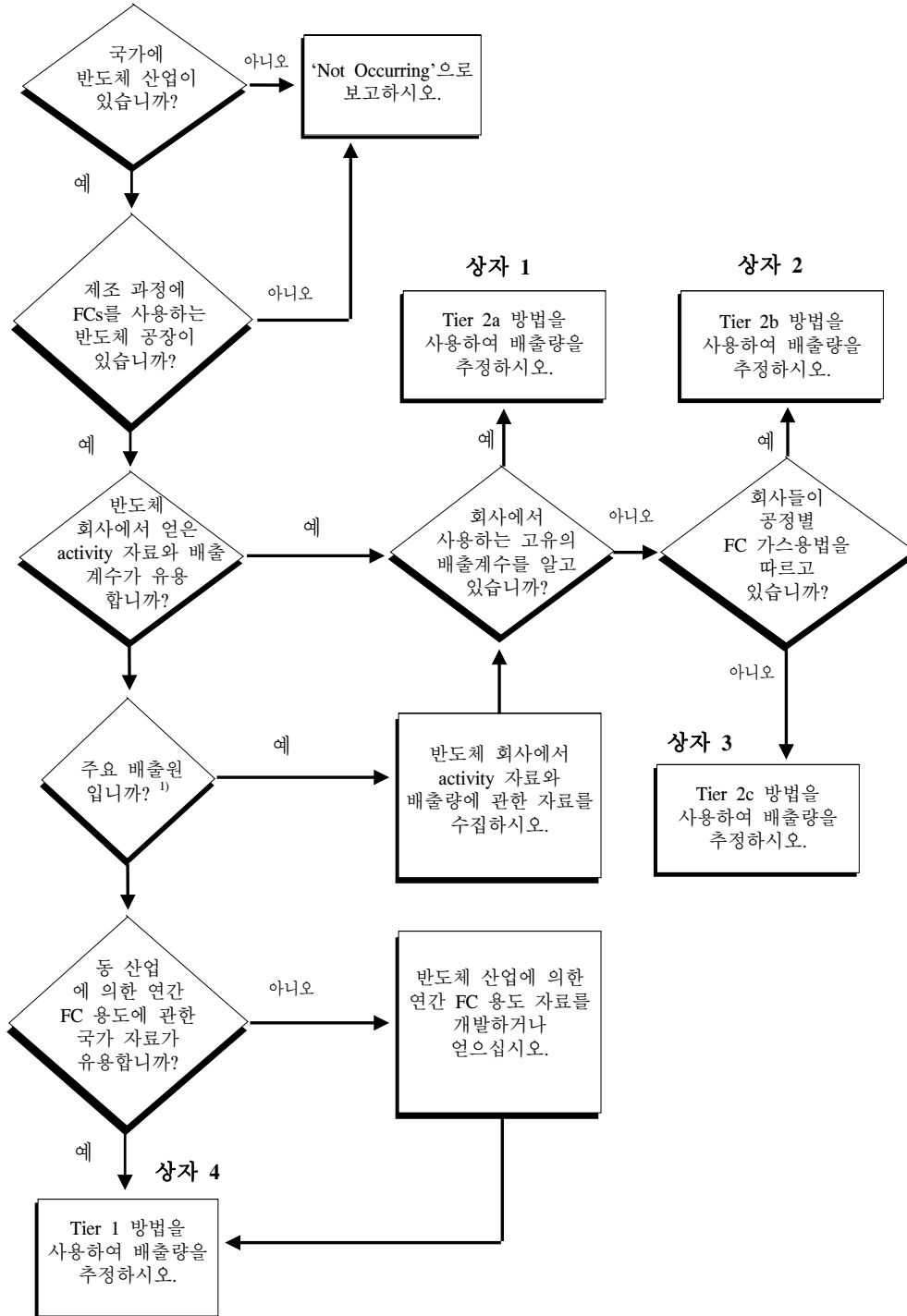
반도체 산업에서는 생산과정에서 탄화플루오르(CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, CHF_3), 3불화질소(NF_3 , nitrogen trifluoride), 육불화황(SF_6) 등이 배출되고 있다¹²⁾. 이런 가스들은 집합적으로 불소화합물(FCs)로 불리며, 반도체 생산의 두 단계에 사용되고 있다 : (1) plasma etching thin films, (2) 청정 chemical vapor deposition(CVD) tool chamber. 이외에 생산 과정에 사용된 불소화합물의 일부분은 CF_4 로 전환된다.

12) 비록 NF_3 가 현재 IPCC에서 인정한 지구온난화 잠재가능성(GWP)을 갖고 있지 않더라도 NF_3 배출량은 이 장에서 논의되고 있다. Molina et al.의 측정에 의하면 100년 기준으로 GWP가 8,000이며, 대기 중 수명기간을 740년으로 보고 있음(Molina, 1995).

1) 방법론의 선택

배출량은 반도체 생산에 사용된 가스, 사용된 공정(또는 대략 공정 유형[CVD 또는 etch]), 사용된 생산 tool의 혼합, 대기 배출량 처리 기술 이행여부 등에 따라 상이하다. GL 96은 반도체 생산에서의 온실가스 배출량 측정 방법에 대한 지침을 제공하고 있지 않다. 그러나 다른 배출원 부문에 대한 GL 96에서 기술한 기본적인 방법론상의 원칙을 사용하여 GPG 에서는 불소화합물 배출량 추정을 위한 방법론을 4가지로 구분하여 제시하고 있다. 각 방법론간의 차이는 추정에 필요로 하는 자료의 요구량과 배출량 추정 공정의 정교함에 따른 것이며 방법론 선택은 자료 활용가능성에 좌우된다.

최근에는 반도체산업에서 배출되는 온실가스 배출량을 실시간 모니터링하는 것이 기술적으로나 경제적으로 적합하지 않은 방법으로 본다. 그러므로 4가지의 방법론 모두 가스 판매/구매 자료와 배출량에 영향을 미치는 매개 변수 시리즈에 기초하고 있다. 가장 정밀한 방법인 Tier 2a 방법은 기본 값보다 매개 변수에 대한 회사 고유의 값을 필요로 한다. Tier 2b 방법은 에칭과 청정에 사용된 가스 비율과 배출량 처리 기술과 함께 공정에 사용된 가스 비율에 관한 회사 고유의 값을 사용하지만, 일부 또는 다른 모든 변수에는 기본 값에 의존하고 있다. Tier 2c 방법은 배출량 처리 기술과 함께 사용된 가스 비율에 기초한 회사 고유의 자료를 사용하고 있지만, 에칭과 청정을 구별하고 있지 않으며, 다른 변수에 대한 기본 값을 사용하고 있다. Tier 1 방법은 모든 변수에 기본 값을 사용하고 있으며 배출량 처리 기술사용에 대하여 설명하지는 않는다.



[그림 II-4 [반도체 제조사의 FC 배출량 추정 방법론 결정도

2) 활동자료의 선택

반도체산업에서의 activity 자료는 가스 판매량, 구매량 또는 사용량에 관한 자료로 구성되어 있다. 보다 자료 의존도가 높은 Tier 2 방법을 적용하기 위해서는 회사나 공장단계의 가스 구매 자료가 필요하다. Tier 1 방법을 위해서는 회사단계의 가스 구매자료를 사용하는 것이 더 좋다. 구매 자료를 활용할 수 없는 곳에서는 판매에 대한 자료를 가스 생산자나 유통업자로부터 얻어 사용할 수 있다. 판매 자료는 반도체 산업에 팔린 각각의 가스 비중을 포함해야 한다.

3) 소비량 조사 대안

PFCs는 앞에서 살펴본 바와 같이 반도체 제조와 TFT-LCD 제조 시 사용된다. PFCs를 소비하는 국내의 반도체 제조사는 5개사이며, TFT-LCD 제조사는 3개사이다.

<표 II-24> 반도체 공정용 배출량의 투명성 확보를 위한 정보

	Tier 1	Tier 2c	Tier 2b	Tier 2a
각각의 FC 배출량 (모든 FCs 전체합보다)	X	X	X	X
각각의 FC 판매/구매량	X	X		
각각의 공정 혹은 공정 유형에서 사용된 각 FC의 양 (mass)			X	X
배출통제기술을 적용한 공정에서 사용된 각 FC의 비율		X	X	X
각 공정 혹은 공정유형별 FC 사용율 (기본 값이 사용되지 않은 경우에 한해서 아래의 정보도 필요)				X
각 공정 혹은 공정별 CF ₄ 변환율				X
shipping 컨테이너에 남아 있는 가스의 비율				X
배출통제기술에 의해 파괴된 각 FC 비율				X
배출통제기술에 의해 파괴된 부산물 CF ₄ 비율				X

그러므로 이들 제품의 제조공정에서 공정용 가스로 소비되는 PFCs (반도체 제조용 및 TFT-LCD 제조용 SF₆ 포함)배출량 산정을 위한 기초자료는 한국반도체산업협회

(KSIA)¹³⁾와 한국디스플레이연구조합 (EDIRAK)¹⁴⁾의 도움을 받아야 입수가 가능하다. 두 기관은 반도체 산업과 TFT-LCD 산업을 대표하는 협회로서 온실가스 배출량 저감 사업, 배출통계 작성 등에 매우 적극적이다.

이들 기관으로부터는 MMTCE (Million Metric Ton of Carbon Equivalent) 방식으로 산정된 배출량 자료를 제공 받을 수 있을 뿐 아니라 배출량 산정을 위한 각종 파라메타와 구입량 자료를 제공 받을 수 있다.

다. SF₆

1) 방법론의 선택

[그림 II-5]는 중전기 장치에서의 SF₆ 배출량 산정에 대한 결정도로써 국가의 여러 가지 여건에 따라 적용 가능한 방법에 대한 모범사례를 기술하고 있다. GL 96에서는 중전기 장치에서의 SF₆ 배출량에 대한 잠재적 배출량(Tier 1 방법)과 실제 배출량(Tier2 방법) 추정방법을 모두 포함하고 있으며 중전기 장치에서의 SF₆ 가스 추정방법에 대한 모범사례는 Tier 1 방법론과 현 Tier 2 방법의 두 가지를 사용하는 것이다. 또한 보다 정확한 접근법인 3가지의 변형 방법론(Tier 3) 역시 기술하고 있다. Tier 3 방법을 사용하여 개발된 배출량 추정치가 가장 정확할 것이다. 반면에 Tier 1 방법을 사용하여 개발된 추정치는 배출량보다는 소비량을 반영하고 있기 때문에 가장 정확하지 않을 것이다.

Tier 3 방법론은 Mass-Balance 접근법으로써 해마다 산업에 투입되는 새로운 SF₆의 양을 추적하는 방법이다. 산업에서는 이전 해에 대기 중으로 방출된 누출가스 대신에 새로 구매한 SF₆의 일부를 누출분을 메우는데 사용하고 있다. 새로운 SF₆의 나머지는 전체 장비의 용량의 증가를 채우기 위해 사용되고 있으므로 누출가스를 대체하지는 않는다. 정확한 추정법을 개발하기 위해 이런 접근법은 배출된 가스를 대체하는데 사용한 SF₆와 전체 장비 용량을 증가시키는데 또는 destroyed 가스를 대체하

13) <http://www.ksia.or.kr/>

14) <http://new.edirak.org/>

기 위하여 사용한 SF₆를 구별하는 것이다¹⁵⁾.

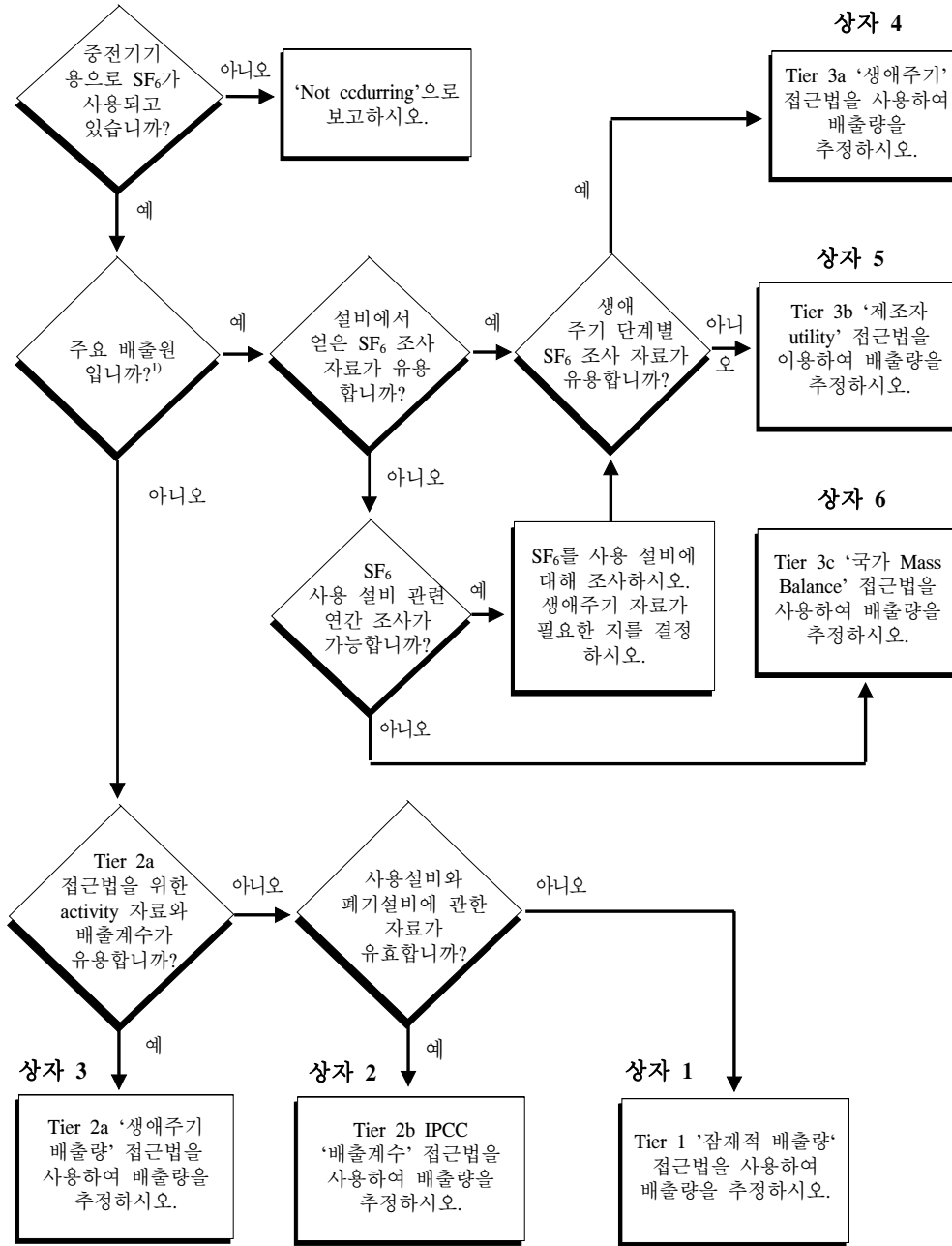
Tier 3 방법론은 Tier 3a (장치의 제품 주기별 배출량), Tier 3b (제조회사 및 발전사 수준에서의 mass-balance 방법), Tier 3c (국가수준에서의 mass balance 방법)의 세 가지가 있다. 식 (19)는 Tier 3a 방법론의 기본식, 식 (20)은 Tier 3b 방법론의 기본식, 식 (21)은 Tier 3c 방법론의 기본식이다.

$$\begin{aligned} \text{총배출량} = & \Sigma \text{생산사의 배출량} + \Sigma \text{설치시 배출량} \\ & + \Sigma \text{사용 배출량} + \Sigma \text{폐기시 배출량} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{총배출량} = \Sigma \text{생산자 배출량} + \Sigma \text{발전사 배출량} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{배출량} = & \text{연간 판매량} - (\text{Nameplate 용량에서의 순증가}) \\ & - (\text{파괴된 SF}_6) \end{aligned} \quad (21)$$

15) 예를 들어 한 해에 한 국가에서 100개의 회로 차단기가 폐기되고 150개의 신규 회로 차단기 (폐기된 차단기와 동일한 용량)를 설치한다고 가정해 보자. 이 경우 그 나라에서 비록 폐기된 100 개의 회로 차단기에서 모든 가스를 회수하고 대체된 150개의 차단기에 사용한다 하더라도 회로 차단기의 생산자 또는 사용자는 적어도 50개의 회로 차단기에 충전시킬 가스를 구입해야 함. '추가로' 50 개의 회로 차단기 충전에 사용된 가스는 장치의 용량을 증가시키는데 사용되고 방출된 가스를 대체하는 것은 아님. 한편 점검기간 동안 오염된 일부 가스는 열 파괴 방법에 의해 파괴됨.



[그림 II-5 [전기 장비에서의 SF6에 관한 결정도

Tier 2 방법론은 Tier 2a (제품 주기 배출계수 접근법), Tier 2b (IPCC 기본 배출계수 접근법)의 두 가지가 있으며, 자료여건이 가장 빈약한 국가들이 사용할 수 있도록

IPCC에서는 Tier 1 방법론 (잠재 배출량 접근법)도 제시하고 있다. 식 (22), (23), (24)는 각각 Tier 2a, Tier 2b, Tier 1 방법론의 기본식이다.

$$\begin{aligned} \text{총배출량} &= \text{생산 배출량} + \text{설치 배출량} \\ &+ \text{사용 배출량} + \text{처리 배출량} \end{aligned} \quad (22)$$

$$t \text{ 년도의 } SF_6 \text{ 배출량} = [t\text{년도에 운영중인 기존장비의 stock에 충전된 } SF_6 \text{ 총량의 } 2\%] + [\text{폐기되는 장비 Nameplate 상 } SF_6 \text{ 량의 } 95\%] \quad (23)$$

$$\text{잠재적 } SF_6 \text{ 배출량} = \text{생산} + [\text{수입} - \text{수출}] - \text{파손량} \quad (24)$$

배출통계 작성기관에서는 얼마나 많은 SF₆ 양이 발전사사업자와 장치 생산자에게 팔렸는지를 결정하는 것이 필요할 것이다. 중전기기로부터의 SF₆ 배출량 산정은 다음의 식 (25)에 의해 구할 수도 있다.

$$\begin{aligned} \text{중전기기에서의 } SF_6 \text{ 배출량} &= \text{기기 생산자에게 판매된 } SF_6 \text{ 량} \\ &+ \text{사용자에게 판매된 } SF_6 \text{ 량} + [\text{수입기기내의 } SF_6 \text{ 량} \\ &- \text{수출기기내의 } SF_6 \text{ 량}] \end{aligned} \quad (25)$$

2) 활동자료의 선택

GPG¹⁶⁾에서는 중전기기용 SF₆ 가스배출량 산정을 위해 Tier 3 방법에 적용 가능한 파라메타를 제시하고 있다. 동 파라메타는 Tier 1 방법과 Tier 2 방법에도 적용되는 파라메타이다. 오직 Tier 2 방법만을 위해 유일하게 요구되는 것은 중전기기의 총 nameplate 용량이다. nameplate 용량은 직접 사이트를 조사하거나 기기의 사용기간 (예를 들면 최근 30년)중에 있는 중전기기를 판매한 제조업자들을 대상으로 한 조사를 통해 추정할 수 있다.

16) IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000

<표 II-25> 중전기기용 SF₆ 배출량 산정을 위한 Tier별 모범사례 정보

	Tier 3a	Tier 3b	Tier 3c	Tier 2a	Tier 2b	Tier 1
기기 생산자와 발전사에 대한 SF ₆ 연간 판매량			x			x
새로운 기기의 nameplate 용량	x	x	x	x		
기존하는 기기의 nameplate 용량				x	x	
폐기하는 기기의 nameplate 용량	x	x	x	x	x	
파괴된 SF ₆ 량	x	x	x			x
SF ₆ 가스의 연초재고량	x	x				
SF ₆ 가스의 연말재고량	x	x				
facility가 구매한 SF ₆ 량	x	x				
facility가 팔거나 반품한 SF ₆ 량	x	x				
재생을 위해 off-site에 보내진 SF ₆ 량	x	x				
재생 후 site로 돌아온 SF ₆ 량	x	x				
새로운 장치를 충전하기 위하여 사용된 SF ₆ 량	x					
기기 서비스용으로 사용된 SF ₆ 량	x					
폐기되는 기기로부터 회수한 SF ₆ 량	x					
배출/회수 계수				x	x	
국가 고유계수에 대한 기록				x	x	
SF ₆ 생산량						x
SF ₆ 수입량						x
SF ₆ 수출량						x

자료: GPG, 3.62

3) 소비량 조사 대안

SF₆ 가스는 국내의 경우 반도체 제조용과 중전기기용으로 사용되고 있다. 반도체 제조용 SF₆ 가스는 앞의 PFCs 범주 안에서 같이 다루어 졌으므로 여기에서는 중전기 기용만을 대상으로 한다.

중전기용 SF₆ 가스 소비로 인한 배출량 산정을 위한 기초자료는 한국전기산업진흥회¹⁷⁾가 매년 중전기기 제작사를 대상으로 실사를 통해 소비량을 파악하여 제공해 주고 있다. 그러므로 기존의 소비자료 제공방식인 한국전기산업진흥회를 통한 자료 구득 방법을 지속적으로 활용하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다. 다만 배출량 정밀도 향상을 위한 다양한 자료를 수집하기 위해서는 한국전기산업진흥회와 인벤토리 작성기관간 협조체제를 공고히 하면서 단계적인 진전을 도모하는 것이 좋을 것 같다.

17) <http://www.koema.or.kr/>

III. 석유화학 공정배출 분석방법론

1. 개요

석유화학산업은 화석연료(납사, LPG 등)를 원료로 제품을 생산하는 과정에서 다양한 형태의 온실가스를 배출한다. 전력 및 스팀을 생산하기 위해 화석연료를 직접 제조공정 내에서 연소시키면서 CO₂, CH₄, N₂O의 온실가스를 배출하기도 하고, 타 기업에서 생산한 전력이나 스팀을 구매하여 온실가스 배출에 간접적으로 기여하기도 한다. 몇몇 석유화학 제품 제조공정에서는 화학반응으로 인해 공정 온실가스인 CO₂ 나 CH₄가 배출되기도 한다.

석유화학산업의 공정배출량에 대한 구체적인 논의에 앞서 산업부문의 일반적인 온실가스 배출유형에 대해 살펴보았다. [그림 III-1]은 WRI/WBCSD의 The Greenhouse Gas Protocol¹⁸⁾에서 제시하고 있는 기업 온실가스 인벤토리 구축을 위한 온실가스 배출유형 분류체계이다. 석유화학 산업에서도 이 Protocol에서 제시하고 있는 7가지 온실가스 배출 형태를 모두 찾아볼 수 있다.

각 배출유형별 정의는 다음과 같다.

i) 고정연소배출(Stationary Combustion Emission) : 보일러, 로, 버너, 터빈, 히터, 소각로, 엔진, Flare Stack 등 고정되어 있는 설비에서 연료를 연소시킬 때 발생하는 온실가스의 배출

18) WRI/WBCSD, The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard Revised Edition

Scope1	Stationary Combustion Emission	- Production of electricity, heat, or steam
	Process Emission	- Physical or chemical processing
	Mobile Combustion Emission	- Transportation of material, products, waste, and employees
	Fugitive Emission	- HFC emission during the use of air conditioning equipment
Scope2	Import of electricity	- Indirect Emission associated with the generation of imported electricity
	Import of steam	- Indirect Emission associated with the generation of imported steam
Scope3	Other indirect GHG emission	- Employee business travel - Employee commuting to and from work - Indirect emission from waste management - Emission from the use and end-of-life phases of products

[그림 III-1] The Greenhouse Gas Protocol의 온실가스 배출유형 분류체계

ii) 이동연소배출(Mobile Combustion) : 자동차, 트럭, 버스, 기차, 비행기, 보트, 선박, 마지선 등의 수송용 설비에서 연료를 연소시킬 때 발생하는 온실가스의 배출

iii) 공정배출(Process Emission) : 시멘트 제조공정의 Calcination 공정에서 발생하는 CO₂, 석유화학제품 제조공정의 Catalytic Cracking 공정에서 발생하는 CO₂, 알루미늄 제조공정에서 발생하는 PFC 등과 같이 물리·화학공정에서 발생하는 온실가스의 배출

iv) 탈루성배출(Fugitive Emission) : 석탄 야적장, 폐기물 처리, 냉각탑, 가스처리공정 등에서 발생하는 탈루성 배출과, 접합부위, 밀봉부위, 패킹, 개스킷과 같은 시설에서 의도적, 비의도적으로 배출되는 온실가스

v) 전력/열/스팀 구매배출(Import of electricity/heat/steam) : 전기, 열, 스팀을 구매함으로써 간접적으로 배출되는 온실가스. 전력, 열, 스팀을 판매함으로써 기인한

온실가스 배출은 i) 고정연소배출로 분류된다.

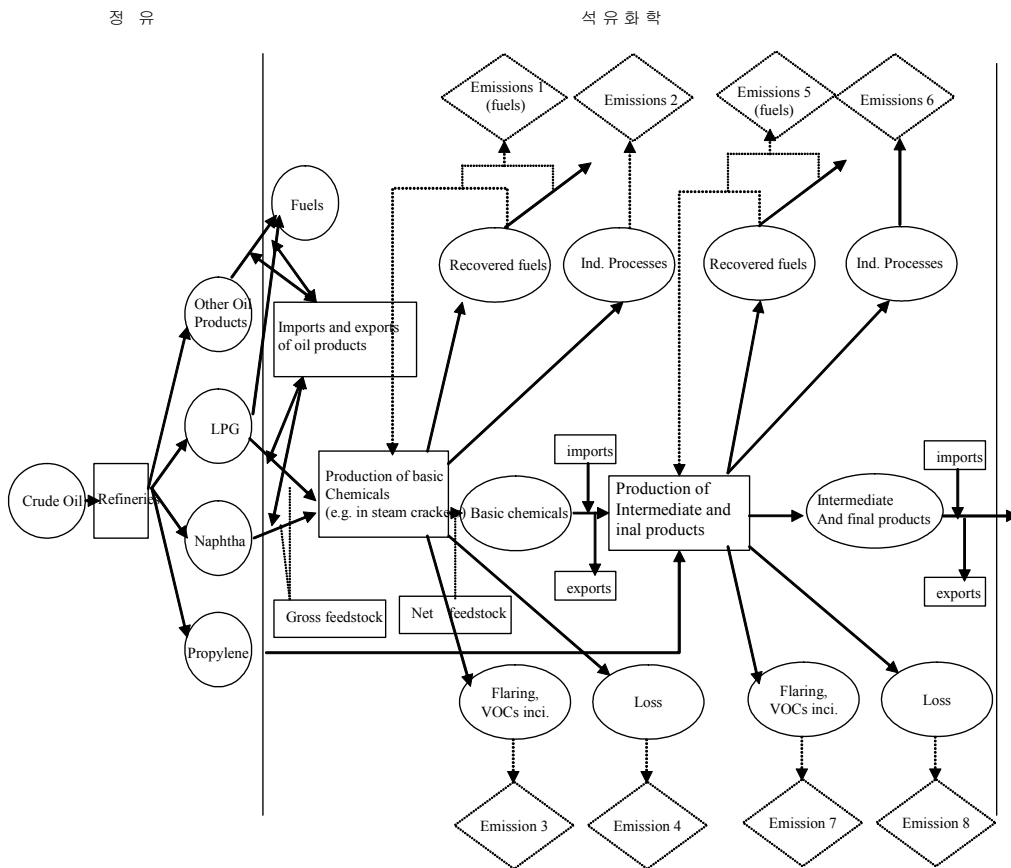
vi) 기타 간접배출(Other indirect GHG emission) : 해당 기업의 경영행위에 의해 발생하는 온실가스 배출이기는 하지만 타기업이 통제하고 있는 배출원에서 발생하는 온실가스로 다음과 같은 경영행위 및 온실가스 배출유형이 이 범주에 포함된다.

- 고용인의 출장
- 제품의 수송, 위탁처리하는 폐기물의 수송
- 제품의 위탁생산, 가맹점 운영
- 매립폐기물에서 발생하는 메탄 배출과 같이 해당 기업에서 발생하는 폐기물을 타 기업이 소유, 통제하고 있는 배출원을 통해서 처리
- 생산제품 및 서비스의 사용과정 중의 배출, 제품의 end-of-life phase에서의 배출
- 고용인의 출퇴근

The Greenhouse Gas Protocol의 온실가스 배출유형 분류체계 중 고정연소배출, 전력/열/스팀 구매배출과 같은 에너지부문 온실가스 배출량 산정방법은 국가 온실가스 배출량 계산지침인 GL 96과 국외의 다양한 기업 온실가스 인벤토리 산정지침¹⁹⁾에서 제시되고 있으며, 공통적으로 모든 업종에 적용가능하다. 물론, 석유화학 업종에도 이러한 에너지부문의 온실가스 배출량 계산방식은 유효하게 적용된다. 반면 공정배출 등을 포함한 비에너지 분야에서 석유화학부문에 적용할 만한 온실가스 배출량 계산방법은 아직 그 개발이 미흡한 것이 현실이다. 화석연료를 에너지원으로 전환하기 위해 연소시키는 경우나 전력 및 스팀과 같은 외부 구매 에너지원으로 부터의 직간접 온실가스 배출을 제외하고 석유화학 부문의 비에너지 부문의 온실가스 배출유형은 4가지 형태로 분류할 수 있다. 이러한 온실가스는 공정 화학반응을 통해 직접 발

19) Climate Leaders Cross Sector Core Modules Guidance, California Climate Action Registry General Reporting Protocol, Guidelines for the Measurement and Reporting of Emissions by Direct Participants in the UK Emissions Trading Scheme, Petroleum Industry Guidelines for Reporting Greenhouse Gas Emissions 등

생하기도 하고, 일부 탄소함유물들이 공정흐름을 따라 이동하다가 후처리 과정 중에 온실가스로 전환되기도 한다. [그림 III-2]는 비에너지부문의 석유화학 공정에서 발생하는 온실가스 배출유형과 그 배출원의 위치를 간략하게 나타낸 것이다.



[그림 III-2] 석유화학공정의 비에너지부문 온실가스 배출유형

i) 공정 부생가스나 부생액체를 연료로 사용([그림 III-2]의 Emission 1, 5) : 제품생산 공정의 원료로 사용하는 화석연료는 각 단위공정을 거치면서 새로운 부연료로 변환되기도 한다. 이러한 부원료는 문헌이나 실제 연료시장에서 흔히 접할 수 있는 상용연료가 아닌, 해당 공정의 특성에 따라 다양한 물성을 갖는 새로운 부생 연료원으로, 소각로, 보일러, 히터 등의 에너지원으로 사용되며, 그 결과 온실가스가 대기 중

으로 배출된다.

ii) 화학반응에 의한 공정배출([그림 III-2]의 Emission 2, 6) : 화석연료가 에너지원이 아닌 제품 제조 원료로 사용되고, 이러한 원료가 제조 공정 중에 화학반응에 의해 산화되어 온실가스가 생성되는 과정은 전형적인 석유화학공정 온실가스 배출유형의 하나이며, 화석연료의 연소공정과는 엄격히 분리되는 개념이다. 공정이 발열반응이라 할지라도 연소공정으로 분류하지는 않는다. 이러한 공정에서 화학반응의 결과로 발생하는 온실가스를 공정배출이라 한다. 본 연구를 통해서 이러한 석유화학공정의 공정배출 현상을 확인하고, 그 계산 방법론을 정립하였다.

iii) VOC의 대기배출 방지를 위한 공정가스 소각([그림 III-2]의 Emission 3, 7) : 석유화학 공장에서 발생하는 VOC는 인체에 유해할 뿐만 아니라 장기적으로 지구 오존층을 파괴하는 물질로써, 배관, 탱크 등의 이송, 저장시설에서의 누출을 관리해야 한다. 이러한 VOC 물질이 대기 중으로 배출되는 것을 방지하기 위한 공정가스 소각기술이 일반화되어 있으며, VOC 소각 과정에서 온실가스가 대기중으로 배출된다.

iv) 파이프 등에서의 탈루성 배출([그림 III-2]의 Emission 4, 8) : 공정에서 발생한 온실가스 중 일부는 제품화 되지 못하고 배관이나 저장설비에서 대기중으로 탈루된다. 납사 분해로 등의 일부 공정에서는 분해과정에서 발생한 메탄이 대기 중으로 탈루될 수 있다.

GL 96에서는 온실가스 배출유형을 "Energy", "Industrial Process", "Solvent and Other Product Use", "Agriculture", "Land-Use Change & Forestry", "Waste"의 6개 군으로 분류하고 있다. 이 중 산업공정(Industrial Process) 부문에서는 "Cement Production", "Lime Production" 등 총 22개 산업공정 온실가스 배출원의 배출량 산정지침을 제공하고 있다. GL 96에서 제시하고 있는 산업 공정별 온실가스 배출원 및 배출 온실가스 종류는 <표 III-1>과 같다. GL 96에서는 석유화학 공정의 공정상 온실

가스 배출은 CH₄와 N₂O에 대해서만 배출되는 것으로 기술하였으나 실제로 여러 석유화학 공정에서 공정 CO₂가 배출되고 있다.

<표 III-1> 산업공정별 온실가스 배출원 및 가스종류

공정	온실가스						Ozone and Aerosol Precursors			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PFC	SF ₆	HFC	NO _x	NMVOC	CO	SO ₂
광물생산	시멘트 생산	✓								✓
	석회 생산	✓								✓
	석회석 사용	✓								
	소다회 생산 및 사용	✓								
	아스팔트 roofing							✓	✓	
	도로 포장						✓	✓	✓	✓
	기타	✓	✓					✓	✓	✓
화학산업	암모니아	✓					✓	✓	✓	✓
	질산			✓			✓			
	지방산			✓			✓	✓	✓	
	요소			✓						
	카바이드	✓	✓					✓	✓	✓
	카프로락탐			✓						
금속생산	석유화학제품		✓	✓			✓	✓		✓
	철강산업	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	알루미늄	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	마그네슘	✓				✓	✓	✓	✓	✓
기타	기타 금속	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
	펄프 및 제지						✓	✓	✓	✓
	음식료품							✓		
	Halocarbons 생산				✓	✓	✓			
	Halocarbons 및 SF ₆ 사용				✓	✓	✓			
기타 배출원	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

GL 96에서 제시하고 있는 공정온실가스 배출량 계산 방법의 기본 원칙은 제품의 생산 또는 소비량과 단위 제품 생산/소비량 당의 배출 계수를 곱하는 것이다. 이 계산식은 공정부문에서 온실가스를 계산하기 위한 매우 기본적인 관계식으로 볼 수 있

다. 계산식은 다음과 같다.

$$TOTAL_{ij} = A_j \times EF_{ij}$$

TOTAL_{ij} : 산업부문 j에서의 공정 온실가스 i의 배출량

A_j : 산업부문 j에서의 공정물질의 활동량 또는 생산량(tonnes/yr)

EF_{ij} = 산업부문 j에서의 단위 활동량 당 온실가스 i의 배출계수(tonne/tonne)

그러나, GL 96에서 제시하고 있는 각 산업공정별 공정 온실가스 배출량 계산식은 이러한 기본 계산식 보다는 공정에서 일어나는 화학양론적 반응식에 의한 배출량 계산이 지배적이다. GL 96에서 분류하고 있는 산업공정의 온실가스 배출유형 중 “Cement Production”, “Lime Production”, “Limestone and Dolomite Use”, “Soda Ash Production and Use”, “Ammonia Production”, “Nitric Acid Production”, “Adipic Acid Production” 부문 등에서는 투입 원료물질의 화학양론적 반응에 의해 온실가스 배출량이 결정된다. 다만, Carbon Black, Ethylene 등의 일부 석유화학 제품에 대해서는 <표 III-2>와 같이 CH₄ 배출계수를 제공하여 기본식에 직접 대입함으로써 온실가스 배출량을 계산할 수 있도록 하고 있다.

<표 III-2> 석유화학 제품의 CH₄ 배출계수 : GL 96

석유화학 제품	배출계수 (gCH ₄ /kgProduction)
Carbon Black	11
Ethylene	1
Dichloroethylene	0.4
Styrene	4
Methanol	2
Coke	0.5

WRI/WBCSD에서 출간한 GHG Protocol을 비롯하여, EPA의 Climate Leaders

Program 등에서도 공정온실가스 배출량 분석을 위한 여러 지침 및 계산틀을 제공하고 있다. 이들 지침들도 대부분 GL 96에서 제시한 주요 산업공정부문의 공정 온실가스 배출원에 대한 유사한 해석방법을 제공하고 있다. 그러나, 공정배출 중 가장 복잡하고 다양한 배출원을 포함하고 있는 석유화학 부문의 공정 온실가스 분석방법론에 대해서는 깊이 있는 연구결과를 제시하고 있지 못하다.

본 연구에서는 현재 운전되고 있는 생산공정을 해석하고 실제 적용가능성을 충분히 고려하여 석유화학 산업의 온실가스 배출량의 상당 부분을 차지할 것으로 예상되는 공정배출량 분석방법론을 정립하였다.

2. 공정배출량 계산 방법론

석유화학 공정은 매우 다양하기 때문에 공정배출의 유형도 매우 다양하다. 동일 제품을 생산하는 공정이라 할지라도 공정을 설계한 License나 공정의 운전방법에 따라 온실가스의 배출유무 및 배출원단위(배출계수)가 달라질 수 있다. 석유화학 공정의 공정 온실가스 배출량은 본 연구에서 제시하는 방법론을 이용하여 접근할 수 있다. 이러한 방법론들은 석유화학산업의 어느 한 특별 공정에만 국한하여 적용할 수 있는 것이 아니라 유기화합물 및 무기화합물, 연속공정 및 배치공정에 걸쳐 폭넓게 적용할 수 있다. 공정 온실가스 배출량 계산에 필요한 자료의 확보 가능성, 정확성 및 온실가스가 생성되는 과정에 따라 석유화학 공정에서 발생하는 공정 온실가스 배출량 계산 방법은 다양하게 적용될 수 있다. 이러한 다양성을 추종할 수 있도록 계산 방법론들이 개발되었으므로, 본 연구에서 제시되는 방법론들을 수정·보완함으로써 다른 모든 산업부문의 공정배출량 산정에도 활용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 총 7가지의 공정배출량 산정방법론을 제시하였다. 이 방법론들은 국외의 온실가스 배출량 계산 프로토콜들과 실제 국내 석유화학공정의 공정배출량을 계산하는 과정에서 축적된 정보과 지식을 바탕으로 수립되었다. 따라서 방법론들의 국제적 신뢰성 확보는 물론 실제 현장의 공정배출량 분석 시에도 손색없이 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 제안하는 석유화학 공정의 공정온실가스 배출량 분석방법론의 종류와 각 방법론의 주요 특징은 <표 III-3>과 같다.

<표 III-3> 공정배출량 측정방법론의 종류

구 분		주 요 특 징
직접 측정	연속측정	배출량을 계측기로 직접측정
	주기측정	가스농도와 유량을 측정하여 배출량으로 환산
물질 수지	화학양론	화학반응식, 투입물의 순도 자료로부터 배출량 계산
	탄소수지	투입물과 산출물의 탄소량 차를 이용해 배출량 계산
배출 계수	공인배출계수	IPCC 등 국제기관, 국가, 협회 등에서 공인된 배출계수 이용
	설계배출계수	설계자료에서 기준물질의 배출계수 도출
	측정배출계수	측정을 통한 기준물질의 배출계수 도출

각 방법론에 따라서 공정배출량 산정에 필요한 자료, 이러한 자료를 확보하는 데 소요되는 노력, 해석방법이 다양하다. 이는 운전 중인 석유화학 공정의 자료 확보 가능성에 따라 다양한 방법으로 배출량 해석이 가능함을 의미한다. 공정 자료 확보 가능성에 따른 최적 방법론의 선택방법은 다음 절의 '3. 의사결정도'에서 상세하게 기술하였다.

가. 직접측정

일부 산업공정에서는 연도에서 배출되는 온실가스를 직접 측정할 수 있는 계측기를 설치하여 온실가스 배출량을 직접 모니터링 할 수 있을 것이다. 이러한 모니터링 시스템은 환경규제에 따라 필수적으로 설치한 경우이거나 사업장 내부에서 공정 운전자료 수집을 목적으로 설치하였을 수도 있다. 공정배출로 발생하는 온실가스가 독립된 배관으로 이동하고, 계측기가 이러한 공정배출 온실가스만 측정할 수 있도록 설치되어 있다면, 이 계측기로부터 수집한 온실가스 배출량은 사업장의 가장 일반적인 온실가스 배출인 고정연소 배출(Stationary Combustion)과 구분될 수 있다. 직접 측정 방법은 연속측정 및 주기측정의 두 가지 방법으로 분류할 수 있다.

연속측정(CEM, Continuous Emission Monitoring)은 직접 측정의 한 방법이다. 이

방법에서는 공정가스 배출구에 탐침을 삽입하여 배기관을 통해 흐르는 가스의 농도를 연속해서 지속적인 기간 동안 측정하고 기록한다. 일반적으로 이 방법에서는 공정가스 단위량 당 온실가스량을 측정한다. 연간 배출량은 측정된 온실가스 농도와 대기로 배출되거나 다음 공정으로 이송되는 공정가스량을 계측기 운전시간 동안 곱하여 결정된다. 그러나, 가스물질의 유량을 정확히 측정하기 위해서는 고가의 계측기가 설치되어야 하며, 일반적으로 온실가스 배출량 측정에 대한 규제가 없기 때문에 연속측정은 산업공정의 온실가스 배출량을 측정하는데 일반적인 방법이라 보기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 일부 공정에서는 이러한 연속적 또는 주기적 측정방법을 통해서 생산 효율을 확인할 수 있는 도구로써 중요한 역할을 할 수 있다. 이러한 사업장에서는 측정설비가 갖는 경제적 영향이 크기 때문에 아무런 규제가 없이도 측정시스템이 운용될 수 있다.

연속측정법을 이용하여 계산된 온실가스 배출량의 정확도는 측정기기 및 제반 시스템의 신뢰도 및 그 신뢰도의 지속성과 밀접한 관계가 있다. 정밀 측정기기를 설치하여 연속측정 방법으로 산정된 배출량은 다른 산정방법에 비하여 신뢰도가 높으나, 설치비용이 추가적으로 소요된다.

공정 온실가스 배출량은 주기측정법(Periodic Measurement)에 의해서도 측정가능하다. 연속 측정과 마찬가지로 주기적 측정법도 배기관을 통해 흐르는 온실가스를 직접 측정한다. 측정법의 명칭에서도 쉽게 알 수 있듯이 주기적 측정법은 일정 시기에 특정한 지점의 온실가스 배출샘플을 취하여 공정 온실가스 배출량 산정을 위한 기초자료로 이용한다. 측정을 통해 수집된 자료, 배기량, 여러 활동량 자료를 외삽법을 이용하여 일정기간 동안의 온실가스 배출총량으로 환산한다. 주기적 측정방법으로는 일정 순간의 총 온실가스 배출량 샘플만을 알 수 있으므로, 배출량의 변화 추이에 따라 연속 측정 방법과는 정확도에 있어 질적 차이가 발생하는 것을 피할 수 없다. 제품의 생산량이 계속 바뀌는 경우라면 연속측정 방법과는 달리 주기측정법으로 도출된 결과는 매우 낮은 신뢰도를 보일 것이다. 가스유량을 정확히 알고 있고,

공정이 연속적으로 운전되는 경우와 같이 가스유량이 변하지 않는다면 이러한 차이는 거의 발생하지 않을 것이다. 또한 계산자가 공정 온실가스 배출량의 분포 특성을 잘 이해하고 있다면, 주기적인 모니터링 방법으로도 연속 측정 수준의 배출량을 산정할 수 있다.

직접 측정 방법을 이용하여 공정 온실가스 배출량을 계산할 때에는 관련 법규의 규제를 받고 있지 않은 배출량 모니터링 자료를 주의 깊게 관리하여야 한다. 측정을 통해 수집된 배출량 자료는 오직 측정하는 기계의 정확도에 의존하게 된다. 연속적으로 모니터링 하는 경우가 아니라면, 계측기로부터 수집된 기체농도 자료는 연도안의 특정 위치, 특정 시간의 자료를 나타낸다. 기체샘플 농도로부터 일정기간 동안의 온실가스 배출량을 정확히 환산하려면 연도안의 기체유량을 계산해야 한다. 많은 경우에 기체유량 계산은 어렵고 부정확하다. 더구나, 1회 측정이나 주기적인 측정 방법에 근거한 공정 배출량 측정은 자료에 대한 보정이 필요하고, 생산공정의 변경이나 생산규모의 증대와 같이 정상 운전 상태가 변경되면 측정설비 시스템을 재조정해야 한다. 직접측정을 위한 제반 자료의 불확실성이 주의 깊게 관리되지 않는 경우라면 직접측정 이외의 공정 배출량 산정방법론들이 보다 적은 비용으로 보다 정확한 결과를 제공할 수 있다.

직접 측정으로 공정 온실가스 배출량을 계산할 경우에는 일관성과 신뢰성을 높이기 위해서 측정 시스템을 주기적으로 보정해야 한다. 배출원과 측정 방법이 다양하므로, 본 연구에서는 측정 시스템의 보정 방법에 대한 내용은 제외하였다.

직접 측정으로 온실가스 배출량을 계산할 때에는 측정 시스템의 정확도를 검증할 수 있는 내부의 QC지침을 따라야 한다. 몇몇 산업부문에는 국제적으로 인정된 측정 방법을 확보할 수 있을 것이다. 이러한 경우 공인된 측정방법을 이용하는 것이 바람직하다. 해당 산업부문에 적합한 표준화된 측정 방법이 없다면, 국제적으로 인증되어 있고 일반화 되어 있는 표준에 따라서 측정 시스템을 관리하고 보정해야 한다. "The

International Organization for Standardization (ISO)가 이러한 국제적으로 인정된 표준을 제공하는 기관 중의 하나이다. ISO의 가이드라인인 “ISO 10012 - Measurement Management Systems - Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment”에서 측정 시스템을 관리하고 보정하기 위한 일반화된 지침을 참조할 수 있다.

국내에서는 온실가스가 환경오염물질로 규정되어 있지 않아 어떠한 배출규제나 감시 시스템 설치 의무가 없기 때문에 직접 측정에 의한 방법은 공정 운전 상태를 모니터링하기 위해 온실가스의 측정이 필요한 경우에만 적용되고 있다. 개발된 방법론을 실제 운전되고 있는 석유화학 공정에 적용하는 과정에서 일부 공정에서 온실가스를 연속적으로 측정할 수 있는 계측기가 설치되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 온실가스 측정에 대한 환경규제가 없고, 설치된 계측기가 공정의 정상운전 상태를 모니터링 하기 위한 목적으로 이용되고 있었으므로, 배출량 측정데이터의 신뢰도는 높다하기 어려웠다. 연속측정 계측기로부터 얻어지는 온실가스량이 유효하려면 계측기가 항상 일정수준 이상의 신뢰도를 유지해야 하므로, 엄격한 관리기준과 주기적인 검교정이 필요하다.

나. 물질수지

물질수지 방법은 단위설비, 단위공정, 여러 개의 단위공정으로 구성된 시스템, 또는 전 공정에 투입되는 물질의 구성 요소들이 가지고 있는 질량과 에너지량은 어떠한 형태로든 화학적으로 공정 산출물에 전달되어야 한다는 질량 및 에너지 보존원칙에 기반하고 있다. 이 방법론은 공정(물질이 축적되거나 소멸되는 공정도 포함)상에서 물질이 유입되고 산출되는 차이에 의해서 배출량이 결정된다. 공정상에 축적되거나 소멸되는 물질이 없다면, 공정에 투입된 물질량은 산출된 물질량과 일치해야 한다. 이 방법을 사용하여 공정 온실가스 배출량을 계산할 때에는 공정에서 소비되는 원료물질과 생산되는 제품의 특정한 화학반응과 물질량에 대한 정보가 확보되어야 한다. 공정에서 발생하는

투입물의 화학반응에 대한 정확한 이해가 없는 사용자는 본 방법론을 이용하여 온실 가스 배출량을 계산해서는 안 된다.

물질수지 방법의 이론적인 수식은 다음과 같다.

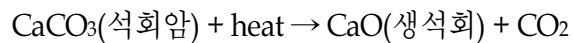
$$M_{in} = M_{out} + M_{accumulated/depleted}$$

M_{in} : 투입물의 질량

M_{out} : 산출물 및 대기 배출물의 질량

$M_{accumulated/depleted}$: 공정 내에 축적되거나 소멸된 물질량

물질수지 방법의 정확도는 계산에 필요한 자료의 확보가능성, 정확성과 온실가스를 생성시키는 반응물의 반응 특성에 좌우된다. 물질수지법을 이용하여 산정한 온실가스 배출량은 배출원의 특성에 따라 신뢰성에 차이가 발생한다. 이 방법을 이용할 때에는 원료조성, 원료량, 첨가물질 조성, 첨가물질량, 제품 조성, 제품량 등 많은 운전 자료가 필요한 경우도 있고, 소수의 공정자료 만으로도 계산이 가능한 경우도 있다. 온실가스 배출량은 화학 반응에 참여하는 투입·산출물의 화학 양론적 비율을 이용하여 계산할 수 있다. 후반부에 설명될 탄소수지법과 구별하기 위해 이 방법을 본 연구에서는 화학양론법이라 명명하였다. 석유화학 공정은 아니지만 화학양론법을 설명할 수 있는 대표적인 공정을 예로 석회 생산 공정을 꼽을 수 있다. 석회를 생산하는 공정에서는 열을 가하여 석회암을 생석회로 만드는 단계에서 이산화탄소가 배출된다. 반응식은 다음과 같다.



이 때, 투입된 석회석의 질량과 석회석이 이산화탄소로 전환되는 비율을 정확히 알고 있다면 물질수지 방법의 원칙에 따라 이산화탄소 배출량을 계산할 수 있다. 그러나 여기에는 공정에 투입된 석회암의 순도가 100%라는 가정이 존재한다. 실제로 석회암의 순도는 매우

다양하다. 반응공정에서 순도 85%의 석회암이 처리되고 있음에도 불구하고, 석회암의 순도를 100%로 가정한다면, 약 18% 정도의 온실가스가 초과 배출되는 것으로 계산된다.

본 방법론을 사용하고자 할 때는 공정에 대해 충분히 이해하고 있는 전문가가 있는지, 물질수지 작성을 위한 충분한 운전자료를 확보할 수 있는지를 사전에 평가해야 하며, 가능하다면 배출계수 방법론과 같은 보다 간단한 방법론에 의해 도출된 배출량과 상호 비교해 보아야 한다.

탄소수지는 이러한 물질수지 방법 중의 하나로 볼 수 있으며, 투입 원료 및 최종 제품에 포함되어 있는 탄소량의 차이로써 이산화탄소 배출량을 추정하는 방법이다. 공정배출, VOC 소각설비에서의 배출, 부생물을 에너지원으로 사용하는 설비에서의 배출을 모두 포함한 석유화학 공정의 온실가스 배출량을 계산하고자 한다면 탄소수지 방법이 효과적으로 적용될 수 있다. 석유화학 부문에서는 공정에서 나오는 유해가스를 대부분 소각하므로 유해가스 안에 포함되어 있는 탄소성분은 대부분 이산화탄소로 전환 배출된다. 공정 부생물도 대부분 탄소와 수소로 이루어져 있어 좋은 에너지원이므로 공정의 연료연소설비나 별도의 공정 부생물 소각설비를 이용하여 연소시키고 에너지를 회수한다. 이때에도 공정 부생물에 포함되어 있는 탄소성분은 이산화탄소로 전환된다.

IPCC Guideline에서는 에너지부문의 국가 온실가스 배출량을 계산할 때, 분석경계에 유입되는 에너지원에 포함되어 있는 탄소량에서 제품에 몰입되어 분석경계 외부로 나가는 탄소량을 차감하여 이산화탄소 배출량을 계산한다. 이를 석유화학 공정에 응용하면, 석유화학 공정으로 유입되는 Feed Stock에 포함되어 있는 탄소량과 최종 제품에 몰입되어 있는 탄소량의 차이로써 공정배출량을 포함한 에너지원 이외의 온실가스 배출량을 계산할 수 있다. 이 때 에너지원으로 사용된 화석연료량은 Feed Stock과 반드시 분리하여 계산해야 한다. 탈루성 배출의 영향이 크지 않다면 이러한 방법으로 [그림 III-2]의 석유화학 공정도에 나타나 있는 Emission 1, 2, 3, 5, 6, 7에

서 발생하는 총 이산화탄소 배출량을 계산할 수 있다. 즉, 탄소수지 방법으로 비에너지 이용부문의 온실가스를 실 배출량과 근접하게 계산할 수 있다. 이 방법을 통해 계산된 공정배출량은 GHG Protocol에서 분류하고 있는 공정배출과는 다소 차이가 있다. GHG Protocol에서는 소각배출은 공정배출이 아닌 고정연소배출 부문으로 포함시키고 있기 때문이다. 단, 이 방법에서는 탈루성 배출에 의한 탄소손실분까지 포함하기는 어렵다.

다. 배출계수

배출계수는 공정의 온실가스 배출 관련 정보를 담고 있는 일종의 대푯값이라 할 수 있다. 하나의 숫자이지만 많은 제반자료들로부터 도출된 배출량 계산을 위한 핵심 인자인 셈이다. 이 방법에 의한 배출량 계산의 정확성은 사용된 배출 계수의 정확성과 공정의 부하 변동에 따라 달라진다. 온실가스 배출량 산정에 사용하는 배출계수는 배출원으로 부터의 온실가스 배출량, 배출공정의 기준 활동값을 이용하여 계산한다. 좋은 배출계수는 해당 공정에 대해 동일 업종을 대표할 수 있는 평균값이며, 특정 산업부문에 대표성을 가진 많은 설비 및 배출원에 대한 면밀한 조사를 기반으로 도출되어야 한다. 공정에 대한 충분한 이해와 검증 자료를 바탕으로 사업장 고유의 배출계수를 만들어 낼 수도 있다.

이 방법은 적용되는 배출계수의 정확도 및 확보가능성에 따라 세 가지로 분류할 수 있다. 온실가스 배출량 계산 지침을 제공하거나 배출량을 검증하는 국내외 공신력 있는 기구에서 제공하는 배출계수를 이용하는 공인배출계수법이 그 하나이다. IPCC와 같은 국제 기구, 정부기관, 각 업종별 협회 등의 기관에서 발표한 자료를 이용할 수 있다. 이러한 배출계수는 일반적으로 특정한 유형의 설비들 혹은 특정 산업부문 특성치들의 평균값을 사용하여 계산 가능하다. 공인배출계수의 오차는 배출계수 도출 방법에 영향을 받는다. 공인배출계수를 사용하면 사업장 고유의 배출계수를 사용하는 경우에 비하여 배출량의 정확도가 낮아지게 된다.

사업장 고유의 배출계수는 측정배출계수와 설계배출계수로 구분할 수 있다. 측정배출계수는 가스샘플 측정기와 공정 기준물질의 활동량을 이용하여 사업장 고유의 배출계수를 도출하는 방법이다. 계측기의 신뢰도가 높고 정확한 가스유량 자료가 공정부하율별로 확보될 수 있다면 이 방법은 배출계수법 중 가장 높은 신뢰도를 보일 것이다. 설계배출계수는 운전 중인 공정의 설계자료로부터 공정온실가스 배출량과 기준물질의 활동량 자료를 확보하고 배출계수화하는 방법이다. 이 방법은 국내 대부분의 석유화학 공정배출 분석에 비용효율적으로 적용될 수 있다.

GL 96에서는 석유화학 공정배출량 계산에 사용할 수 있는 배출계수를 제한적으로 제공하고 있다. 현재까지는 국내 정부기관, 협회 등에서 공표한 공정부문 온실가스 배출계수는 없는 실정이다. 각 기업 및 사업단위에서도 공정 배출량 측정, 배출활동 등을 측정하거나 또는 본 연구에서 제시한 다양한 산정방법론을 이용하여 공정온실가스 배출계수를 직접 도출할 수 있다. 일부 특별한 단위설비나 공정에서는 제작자나 판매자로부터 이러한 배출계수를 확보할 수도 있다. 배출 계수는 다양한 자료원을 이용하여 작성된다. 예를 들어, 특정한 공정의 배출계수는 과거에 해당 공정에서 측정된 자료들을 이용하여 간접적으로 계산할 수 있다. 또한, 유사한 타 공정에서 측정 자료로부터 도출할 수도 있다.

IPCC를 포함한 국제기구, 정부기관, 협회 등에서 향후 보다 다양한 석유화학 공정에 대한 배출계수를 제공한다면 공인배출계수를 이용한 공정 온실가스 배출량 계산 방법은 가장 간단한 기본적인 접근법이 될 것이다. 그러나, 이러한 배출계수들은 수많은 배출원들을 측정하고 분석해서 나온 결과물이므로 그 적용에 있어 신중을 기해야 한다. 이러한 배출원들은 적용하고자 하는 공정과 매우 유사한 경우도 있으나, 때로는 궁극적으로 적용할 수 없는 공정에도 적용하는 우를 범할 수도 있기 때문이다. 그러므로, 선택한 배출계수가 분석하고자 하는 공정에 적용가능한지 혹은 해당 공정에 적용 타당한 다른 배출계수는 없는지 항상 유의해야 한다. 때때로 상대적으로 제

한된 샘플을 대상으로한 분석자료를 근거로 배출계수가 작성될 수도 있다.

석유화학 공정은 설계자료에 대한 신뢰도가 매우 높으므로 설계자료로부터 공정에서 발생하는 온실가스량과 기준활동량을 찾아 이를 이용하여 사업장 고유의 공정 온실가스 배출계수를 도출할 수 있다. 기준물질은 공정 대표 제품이나 주원료로 선정하고 이 값으로 공정 온실가스 배출량을 나누면 해당 공정의 온실가스 배출계수를 결정할 수 있다. 조사 대상 공정에 공정온실가스 배출량 분석방법을 적용하는 과정에서 설계자료를 이용하여 석유화학 사업장 고유의 배출계수를 비용 효율적으로 도출할 수 있었다. 더구나 이 방법은 모든 조사대상 사업장에 적용 가능하였다. 물론 정확한 측정에 의한 배출계수나 화학양론적 반응이 명확하여 물질수지법을 이용하여 계산된 배출계수에 비해 신뢰도가 다소 떨어지나 이러한 두 가지 방법을 적용할 수 없는 경우이거나, 측정기기의 신뢰도가 낮은 경우에는 설계배출계수가 공정온실가스 배출계수도 유효하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 오히려, 측정설비의 신뢰도가 지속적으로 유지되지 못하거나, 화학양론법을 적용하기 위한 기준물질의 순도 파악이 어렵다면 지 할 경우에는 이러한 설계자료를 기준으로 도출된 배출계수가 보다 높은 신뢰도를 나타낼 수도 있을 것이다. 설계자료 기준 배출계수법에서는 도출된 배출계수와 기준 활동량의 연간 합계를 곱하여 연간 공정온실가스 배출량을 계산할 수 있다.

측정배출계수법은 Batch 공정에도 적용가능하다. Batch 공정에서도 1 Batch 동안의 배기유량의 분포와 각 유량별 온실가스를 샘플링한다면 1 Batch동안 생산되는 기준물질(제품, 투입물) 당 온실가스 배출계수를 만들어 낼 수 있다. 이 배출계수에 연간 기준물질생산량 또는 투입량을 곱하면 연간 온실가스 배출량을 환산할 수 있다.

설계배출계수 및 측정배출계수를 이용한 온실가스 배출량 계산식과 배출계수 계산식은 다음과 같다.

$$E_x = BQ \times CEF_x \quad \text{또는} \quad E_x = BQ \times EF_x \times \frac{100 - CE_x}{100}$$

E_x : 온실가스 x 의 배출량, kg

BQ : 배출활동량 혹은 기준활동량, 단위는 물질에 따라 적용(예 : ton, kNm³ 등)

CEF_x : 온실가스 x 제거설비 통과 후 배출계수, kg/BQ단위

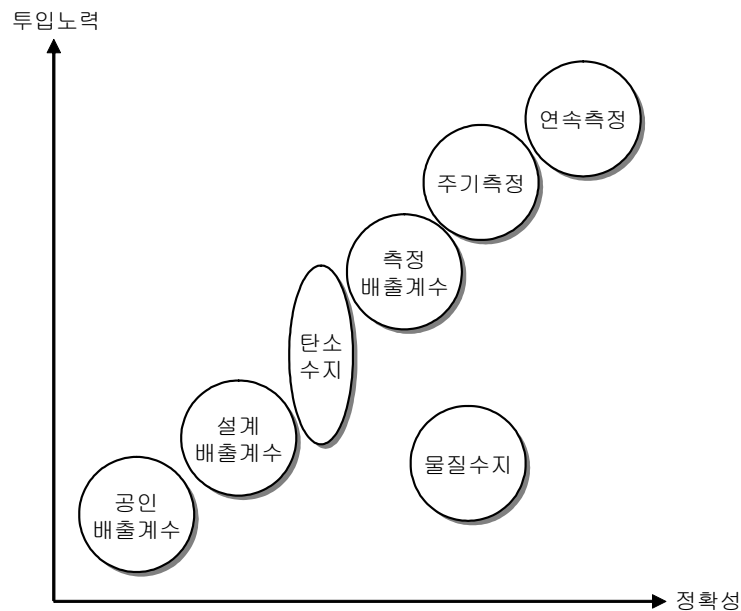
EF_x : 온실가스 x 제거설비 통과 전 배출계수, kg/BQ단위

CE_x : 온실가스 x 제거 효율, %

현장 조사 중 2개 공정에서 온실가스 배출저감 설비가 설치되어 있는 경우를 확인할 수 있었다. 이 설비들을 통해 공정가스 중의 온실가스 농도를 일정수준 이하로 관리함으로써, 공정을 안정적으로 운전하고 제품의 수율을 높이고 있었다. 온실가스 배출량을 산정하기 위해 적용되는 설계, 측정 배출계수를 계산하고자 할 때에는 이러한 공정상 온실가스 감축기술에 의한 저감율도 반드시 반영되어야 한다. 공정온실가스 배출 및 저감을 동시에 고려한 1개 배출계수를 도출할 수 있고, 배출계수 및 저감계수를 각각 만들어 낼 수도 있다.

3. 의사결정도

본 연구에서는 총 7가지의 공정 온실가스 배출량 계산 방법론을 제시하였다. 물론, “탄소수지” 방법은 기업 인벤토리의 고정연소배출 유형에 속하는 소각배출까지 포함하므로 엄격한 의미에서의 공정배출 분석방법론이라 하기는 어렵다. 그러나, 석유화학 공정에서 공정배출을 별도로 분리하지 않고 배출총량을 계산하고자 할 때에는 이 방법론도 유효하게 적용될 수 있을 것으로 보인다. 이들 7가지 방법론은 필요한 자료와 자료수집 및 분석수행에 소요되는 노력이 다르다. [그림 III-3]은 본 연구에서 제안한 공정 온실가스 배출량 분석방법론의 상대적 정확도와 투입노력을 비교한 것이다.



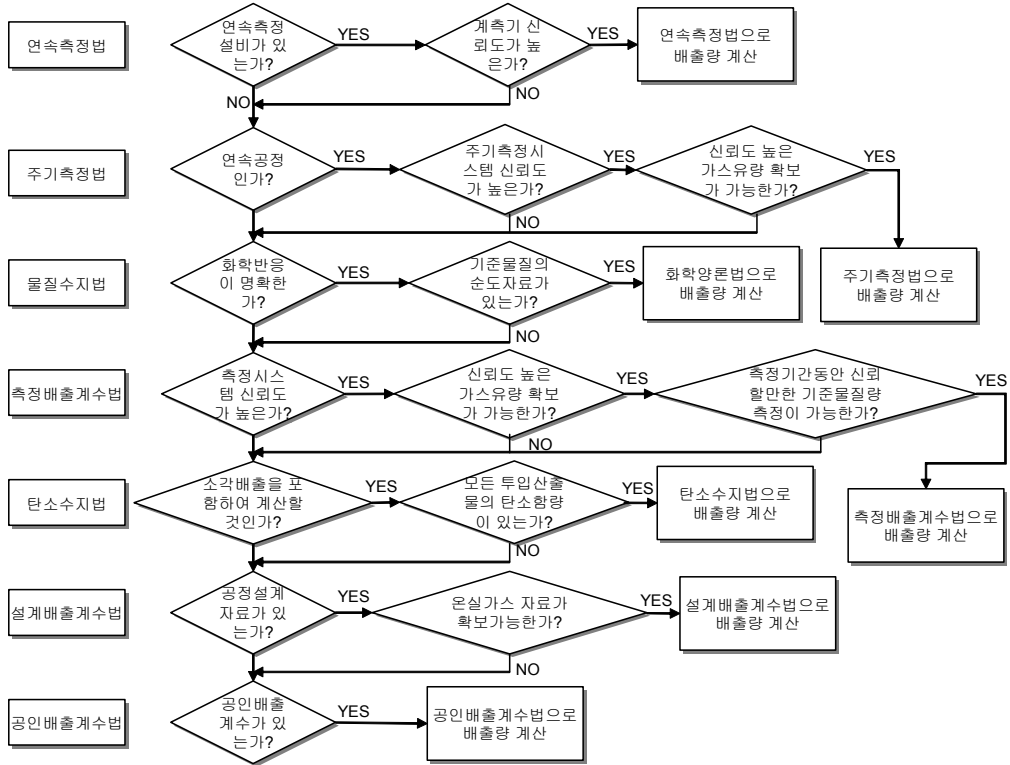
[그림 III-3] 방법론 별 상대적 배출량 신뢰도 및 투입노력

[그림 III-3]에 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안된 공정 온실가스 배출량 분석방

법론의 신뢰도는 연속측정방법이 가장 높으며, GL 96 등 공인기관에서 제시하는 온실가스 배출계수를 이용하는 방법이 가장 낮은 신뢰도를 보일 것으로 예상된다. 대부분의 온실가스 배출량 계산지침에서 해당 공정 고유의 배출계수, 계산방법을 이용할 것을 권고하고 있는 것도 이와 같은 이유이다. 의사결정도에서도 언급되었지만 연속측정방법이 높은 신뢰도를 유지하기 위해서는 계측기로부터 수집되는 자료의 정확도가 무엇보다도 중요하다. 계측기 정확도를 확신할 수 없을 때에는 연속측정이나 주기측정은 가장 낮은 신뢰도를 나타낼 수 있다.

각 방법론을 적용함에 있어, 자료의 확보가능성, 자료의 신뢰도에 따라 배출량 계산의 신뢰도 및 투입되는 노력이 달라질 수 있다. 의사결정도는 공정배출량을 계산하고자 할 때, 7가지 분석방법론 중 투입되는 노력과 배출량의 신뢰도를 종합적으로 고려하여 방법론을 선택할 수 있도록 하는 일종의 방법론 선택지침이다. 기업에 따라서 온실가스 배출량 계산결과의 신뢰도와 소요비용에 대한 중요도가 다르므로, 이 두 가지 인자를 동시에 고려하여 의사결정도를 제시하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 자료의 신뢰도를 우선한 의사결정도를 [그림 Ⅲ-4]와 같이 제시하였다.

<표 Ⅲ-4>는 각 공정 온실가스 배출량 계산방법론을 이용하여 연간 배출량을 집계하는 수식을 나타낸 것이다.



[그림 III-4] 공정 온실가스 배출량 계산방법론 선정을 위한 의사결정도

<표 III-4> 방법론 별 연간 공정 온실가스 배출량 계산방법

방법론 명	연간 공정 온실가스 배출량 계산방법
연속측정	계측기로부터 직접 연간 누적치 자료 확보
주기측정	온실가스 농도 × 가스 유량 × 연간 운전시간
물질수지	화학양론적 전환율 × 기준물질 순도 × 연간 기준물질 투입·산출량
측정배출계수	Σ 배출계수(온실가스 농도 × 가스 유량 ÷ 기준물질량) × 연간 기준물질 투입·산출량 ²⁰⁾
탄소수지	(연간 투입물 탄소 함유량 - 연간 산출물 탄소 함유량) × 44/12
설계배출계수	(온실가스량 ÷ 기준물질량) × 연간 기준물질 투입·산출량
공인배출계수	배출계수 × 연간 기준물질 투입·산출량

20) 공정이 일정한 부하율 범위에서 운전되지 않는 경우에는 부하율 범위별 배출계수를 별도로 구하고, 각 부하율 범위별 연간 제품생산량 값을 곱하여 연간 총 공정배출량을 계산할 수 있음.

연속측정방법을 적용하기 위해서는 반드시 온실가스 배출량을 연속으로 측정할 수 있는 계측기가 공정가스 이송라인에 설치되어 있어야 한다. 온실가스 배출량 측정에 대한 법적, 지역적 규제가 없는 현 시점에서는 이러한 계측기가 이미 설치되어 있는 경우를 제외하면 이 방법론을 적용하기 위해 고가의 계측기를 설치하는 것은 바람직하지 못하다. 뿐만 아니라 향후에 공정 온실가스 배출량 계산이 의무화 되더라도 고가의 측정설비를 설치하기 보다는 본 연구에서 제안하는 다른 비용효율적인 방법론을 이용할 것을 권고한다. 정밀도가 높은 계측기는 초기 설치비도 많이 소요될뿐더러 유지 보수에도 만만치 않은 비용과 인력이 소요되어야 하기 때문이다. 계측기가 설치되어 있는 경우라도 계측기의 검교정이 지속적으로 이루어지고, 오차율이 매우 낮은 수준으로 유지되어야만 이 방법론의 적용이 가능하다. 주기적인 검교정이 이루어지지 않고 있거나, 오차율 관리가 제대로 되고 있지 않은 계측기를 이용하여 측정된 온실가스 배출량은 다른 계산방법론을 적용한 경우에 비해 부정확한 자료를 얻을 수 있다.

연속측정방법을 적용할 수 없다면 주기측정방법을 적용할 수 있는 지 검토해 본다. 가스샘플을 채취하여 단위 공정가스에 포함되어 있는 온실가스 농도를 알 수 있고, 공정가스의 유량을 측정 등의 방법으로 확보할 수 있다면 주기측정방법으로 온실가스 배출량을 계산할 수 있다. 이 방법은 사용자가 가스유량의 변동을 정확하게 알고 있는 경우를 제외한다면 연속공정에서만 유효하게 작용할 것으로 판단된다. 불연속공정이나 공정부하가 자주 변동되는 경우에는 이 방법을 적용하여 도출된 결과값의 신뢰도는 낮다.

주기측정법으로 배출량 산정이 어려울 경우에는 화학양론법을 고려해 본다. 화학양론법은 여러 국제기관에서 제시하고 있는 일반적인 공정배출량 산정방법이다. 이 방법을 적용하고자 할 때는 공정배출을 규명할 수 있는 정확한 화학반응 정보를 알아야 하며, 반응에 참여하는 물질 중 온실가스로 전환되는 물질의 순도자료를 확보

해야 한다. 공정의 압력, 온도와 같이 운전조건이 변경됨에 따라 공정배출로 전환되는 원인물질의 반응율이 변경되는 경우에는 이 방법을 이용할 수 없다.

화학양론법 다음으로 공정배출량 신뢰도가 높을 것으로 예상되는 방법은 측정계수법이다. 측정계수법에서는 무엇보다도 신뢰도 높은 온실가스 계측 시스템이 확보되어야 한다. 계측기를 이용하여 제품생산 부하율에 따른 배출계수를 데이터베이스화하고 공정이 변경되지 않는 동안에 계속해서 이 배출계수를 이용할 수 있다. 제품생산 부하율의 정확한 연간 분포를 알 수 있다면 매우 신뢰도 높은 공정배출량을 계산할 수 있다. 이 방법은 Batch 공정과 같은 불연속 공정에도 효과적으로 적용될 수 있다. 신뢰도 높은 계측기로 한 Batch 동안의 배출량을 측정하고, 연간 몇 Batch의 공정생산 활동이 있었는지, 각 Batch 별 생산량이 얼마인지를 비교함으로써 연간 총 공정배출량을 계산할 수 있다. 주기측정법과 마찬가지로 정확한 가스유량 확보가 중요하다.

탄소수지법은 석유화학 공정배출량뿐만 아니라 VOC 제거를 위한 환경설비, 공정부생물의 에너지화를 위한 전환설비에서 발생하는 모든 이산화탄소 배출량을 계산한다. 따라서 공정배출량만을 계산하고자 할 때에는 이 방법은 적용할 수 없다. 이 방법을 적용하기 위해서는 분석경계로 투입되고 산출되는 모든 원료 및 제품에 포함된 탄소함량을 정확히 알아야 한다. 대부분의 대형 석유화학 공장에서는 원료 및 제품의 성분자료는 매우 신뢰도가 높다. 연간 배출량으로 환산하기 위해서는 산출물과 투입물의 탄소 함유량 연간 누적치의 차에 이산화탄소와 탄소의 분자량 비인 44/12를 곱한다.

설계배출계수법은 국내 대부분의 석유화학 공정배출 분석에 비용 효율적으로 적용될 수 있다. 석유화학 공정은 대부분 대규모 설비로 그 설계 자료의 정확도가 매우 높을 뿐만 아니라 많은 제조 공정들이 설계조건과 유사한 부하율, 물질수지로 운전되고 있다. De-bottlenecking 등 제품 생산량을 증가시키고자 시설변경을 시행하였을

때에도 기존의 설계자료를 신규 운전조건에 맞도록 변경해 놓는다. 따라서 이 방법을 이용하여 배출계수를 결정해 놓으면 매우 편리하게 공정온실가스 배출량을 계산할 수 있다. 이 방법을 이용하기 위해서는 각 설비별로 공정배출 발생 유무와 그 배출량을 확인할 수 있는 설계자료를 확보할 수 있어야 한다.

공인배출계수법은 가장 용이하게 공정온실가스 배출량을 계산할 수 있는 방법이다. 이 방법에서는 IPCC 등 국제기관, 국가, 산업부문에서 제시하는 공인된 배출계수를 이용하여 공정 온실가스 배출량을 계산한다. 계산 전에 해당 공정의 온실가스 배출량을 계산할 수 있는 공인 배출계수가 존재하는지 조사하는 과정이 필요하다. 이 방법은 그 정확성이 가장 낮으므로 앞서 기술된 사업장 고유의 배출계수 적용이 불가능할 경우에 적용하는 것이 바람직하다.

4. 배출량 계산의 QA/QC 및 불확실성

본 연구에서 제안한 석유화학 부문의 공정 온실가스 배출량 계산 방법론과 최적 방법론을 추적할 수 있는 의사결정도는 국가 배출량뿐만 아니라 석유화학 기업의 온실가스 배출량을 계산할 때 배출총량의 품질과 완전성을 한 단계 높이는 역할을 할 것으로 기대된다. 이 장에서는 이러한 배출량의 신뢰도를 보증, 관리할 수 있는 QA/QC의 개념과 계산 방법론을 적용하면서 발생할 수 있는 불확실성의 유형에 대하여 제시하였다. 배출량 계산 과정에서 이러한 QA/QC 개념 및 불확실성 요인들에 유의한다면 계산결과의 신뢰도를 높이는데 도움이 될 것이다.

가. QA/QC 개요

온실가스 배출량은 기업의 온실가스 감축 잠재력 분석이나 감축목표 설정 등에 이용될 수 있다. 또한 배출권거래 등 각종 정책을 수립, 추진하고자 하는 정부와, 기업의 친환경 경영을 감시하는 다른 이해당사자들에게 공개토록 요구될 수 있다. 이 때 정부나 이해당사자들은 어떻게 하면 기업이 보고한 온실가스 배출량이 맞는지 확인하고자 할 것이며, 이에 대한 방법 또한 기업에게 요구할 수 있다. 배출량의 신뢰도를 유지하려면, 배출량 계산에 이용된 자료가 사실이고 정확하다는 것에 대한 확신을 심어줄 수 있는 절차를 수립하고 이 절차에 따라 계산하는 것이 중요하다.

Quality Assurance/Quality Control(QA/QC) 과정은 배출량 평가에 대한 정확도, 정밀성, 그리고 신뢰성을 높이기 위한 과정이다. 효과적인 QA/QC 절차를 수립하면 배출량 계산에 소비되는 시간과 노력을 줄일 수 있다. 좋은 QA 절차가 수립되어 있다면, 배출량 계산결과에 오류가 거의 발생하지 않고, 에러 발생에 의한 반복 작업을 줄일 수 있으며, 배출량 계산결과 및 제반 자료에 관한 정부 및 이해당사자의 의문 사항에 답변해야 하는 수고를 줄일 수 있다.

Quality Assurance(QA)란 온실가스 배출량 계산에 필요한 요건들을 만족시키고 있다는 사실을 입증하기 위한 배출량 산정 계획, 배출량 결정 방법, 완전성, 정확도, 정밀성, 배출량 계산의 표본 등에 대한 조직적인 접근 방법을 의미한다. QA절차는 공인된 지침을 따라 온실가스 배출량을 계산하는 과정 전반에 걸쳐 수행되어야 하며, 데이터 수집, 분석, 운영, 보고에 대한 검토와 검증을 포함한다. QA절차의 목적은 신뢰할 수 있고 합리적인 결과를 얻는 것이다.

Quality Control(QC)란 온실가스 배출량을 측정, 계산하기 위한 일련의 반복적인 행위이며, 수집한 정보와 계산한 배출량 정보의 품질을 관리하는 것이다. QC절차는 온실가스 배출량을 계산하는 전체 과정과 함께 진행되며, 예비 검토, 정확성에 대한 검증, 그리고 표준화된 절차의 사용/확인 과정이 포함된다. QC는 오류 및 비용을 최소화하는 반면, 정확한 결과가 도출될 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다.

QA/QC의 주요 요소를 살펴보면 다음과 같다.

- ✓ 사전 계획
- ✓ 자료 관리
- ✓ 문서 기록 및 훈련
- ✓ 자료 및 시스템 평가
- ✓ 배출량의 정량화
- ✓ 검증/비교(보고)

QA/QC를 계획할 때에는 많은 인자들을 고려해야 한다. 온실가스 인벤토리를 구축할 때에는 "Master Plan"이 필요하며, 여기에는 온실가스 인벤토리 구축의 준비 계획과 구축 결과를 모니터링 하기 위한 품질보증계획이 포함된다. QA/QC 프로그램의 종합적인 성능을 평가하거나 온실가스 인벤토리를 정해진 시간 안에 구축하는

과정에서, 자료품질지표 혹은 자료품질목표치와 지표를 사용하여 연간 량을 계산하고 연도별 값을 비교할 수 있다.

다음과 같은 인자들도 온실가스 인벤토리의 QA/QC 프로그램에서 고려되어야 한다.

i) 자원 : 온실가스 배출량을 계산하고 관리하는 조직은 충분한 자원(인력, 계측기 등의 하드웨어, 소프트웨어 등)을 확보할 수 있는지 확인해야 한다. 또한 이러한 자원의 역할, 경험, 용량, 능력, 교육훈련 등도 고려해야 한다.

ii) 기록 : 법적규제에서 요구하고 있는 사항을 충족 시기기 위해서 또는, 온실가스 인벤토리는 어떠한 요소들로 구성되어 있는가에 대한 기록을 보관하기 위해서, 연도별 재현성을 위한 표준화된 절차 구성 등 여러 가지 목적을 달성하기 위해 적절한 기록을 남겨야 한다.

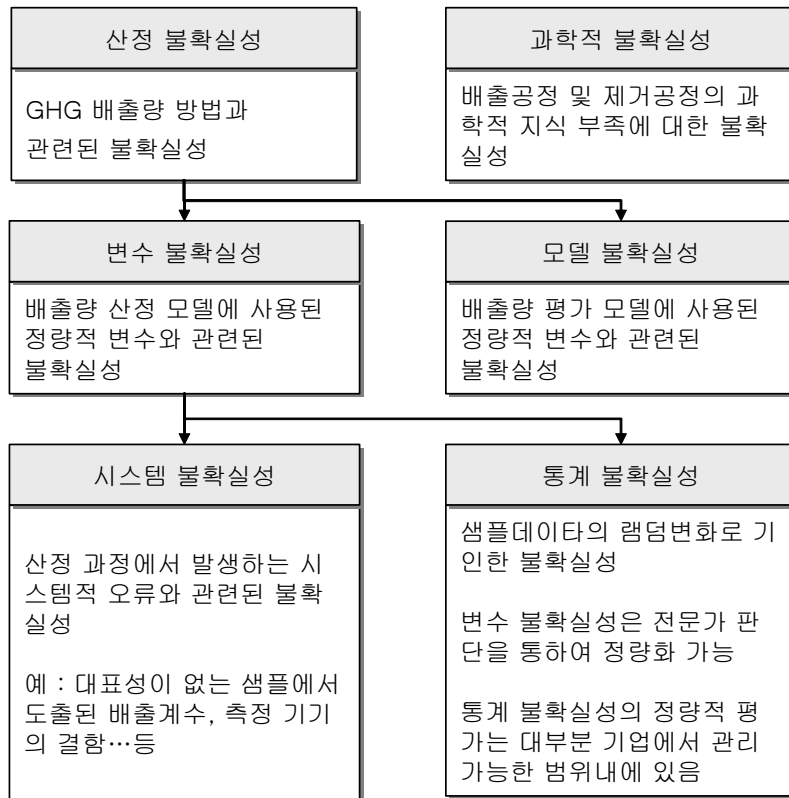
iii) 정보 검증 및 확인 : 온실가스 인벤토리 품질을 보증하기 위해 QA/QC 시스템에 포함될 수 있는 다양한 검증방법이 있다. 여기 에는 자료검토, 실효성검토, 통계 분석, 샘플계산 등이 포함된다.

iv) QA/QC 감시 : 온실가스 인벤토리의 품질을 관리하기 위해서는 온실가스 배출량을 계산하고 인벤토리를 구축한 내부 조직 이외의 별도 조직의 검토가 필요하다. 이러한 검토과정은 계산된 온실가스 배출량 및 인벤토리 자료에 대한 결과의 추종성을 검토하는 단계와, 온실가스 인벤토리 구축절차, 조직 구성절차, 제반 자원을 평가하는 단계로 나뉘어 진다.

나. 불확실성 유형

온실가스 데이터 품질 관리의 중요 요소 중의 하나는 양적·질적 불확실성 분석이다. 예를 들어, 배출권 거래제도에서는 배출권 거래에 참여하는 참여자들에게 그들의 활동(예 : 유럽 배출권 거래)으로부터 발생하는 배출량에 대한 기본적인 불확실성 정보를 요구하고 있다.

[그림 III-5]에 온실가스 배출량 산정과 관련된 불확실성의 종류를 나타내었다.



[그림 III-5] 온실가스 배출량 산정과 관련된 불확실성

온실가스 인벤토리와 관련된 불확실성은 크게 과학적 불확실성과 산정 불확실성으로

로 분류할 수 있다. 과학적 불확실성은 실제 배출량에 대한 지식 혹은 제거 공정에 대한 충분한 이해가 이루어 지지 않을 때 발생한다. 과학적 불확실성의 예로, 중요한 과학적 불확실성을 포함하고 있으면서 온실 가스의 배출량 평가에 이용되는 지구 온난화지수와 직접·간접 배출계수를 들 수 있다. 이러한 과학적 불확실성을 분석하고 정량화하는 것은 기업 차원의 인벤토리 구축 노력의 영역을 벗어나며, 적어도 국가 차원 이상의 불확실성 관리가 필요하다.

산정 불확실성은 온실가스 배출량이 정량화될 때마다 나타난다. 따라서 모든 배출량 혹은 제거량의 평가는 산정 불확실성과 관련되어 있다. 산정 불확실성은 좀 더 세부적으로 모델 불확실성과 변수 불확실성으로 나누어진다.

모델 불확실성은 다양한 변수들과 배출과정의 상관관계를 규명하는 수학적 방정식(즉, 모델)에서 오는 불확실성을 말한다. 예를 들어, 모델 불확실성은 부정확한 수학적 모델을 사용하기 때문에, 혹은 모델 안에서 부적절한 변수(입력자료)를 사용하였을 경우에 발생한다. 과학적 불확실성과 마찬가지로, 모델 불확실성 역시 기업이 극복하기 어려운 영역에 속해 있다. 그러나 일부 기업은 그들의 독특한 과학적인 방법을 사용하기를 원하기도 하며, 기업 배출량 산정모델의 불확실성에 대해서 엔지니어링 전문가의 감정서를 통해 평가하기를 원하기도 한다.

변수 불확실성은 배출량 산정모델에 입력되는 입력자료(예 : 활동량, 배출계수 혹은 다른 변수들)와 같이 정량적인 변수와 관련된 불확실성을 말한다. 변수 불확실성은 통계분석, 측정 장비의 정밀성, 그리고 전문가의 판단을 통하여 평가할 수 있다. 변수 불확실성을 정량화하고, 이러한 변수 불확실성을 유발하는 배출원을 규명하는 것은 인벤토리의 불확실성을 조사하는 기업이 가정 먼저 관심을 갖고 살펴보는 분야가 될 것이다.

변수 불확실성은 대부분의 기업체에서 관리 가능한 범위 내에 있다. 기업 온실가

스 인벤토리의 불확실성을 평가는 필요하기는 하지만 완벽할 수는 없다. 또한 모든 변수의 통계적인 불확실성을 평가하고자 할 때 항상 완전하고 정확한 샘플자료를 확보할 수 있는 것은 아니다. 간혹 단순한 활동량 자료(예 : 구입한 가솔린의 양(ℓ) 혹은 소비된 석회암 tonnes)만이 확보 가능할 수도 있다. 이러한 경우에는 설비 정밀도를 이용하거나 보정된 자료들을 이용하여 통계적 불확실성 평가를 보완할 수 있다. 그러나 변수들과 관련된 시스템적인 불확실성을 정량적으로 평가하고, 통계적인 불확실성 평가를 보완하기 위해 기업은 보통 전문가의 판단에 의존한다. 하지만 전문가의 판단은 변수들이나 배출원에 대한 비교가능하고 일관된 결과를 얻기 어렵다는 단점이 있다.

이러한 이유로, 대부분 모든 온실가스 인벤토리의 불확실성 평가는 완벽하지 못하고 또한 주관적인 관점이 포함되어 있다. 다시 말하면, 대부분의 철저한 노력에도 불구하고, 온실가스 인벤토리 불확실성 평가는 매우 높은 불확실성을 포함하고 있다는 점을 간과해서는 안 된다. 매우 제한된 경우를 제외하고, 불확실성 평가는 다른 기업체와 비교하기 위한 객관적인 측정 지표로 사용될 수 없다. 객관적인 측정지표로 이용되는 경우는 동일한 평가 방법론을 사용하고 비슷한 설비로 운영되는 두 개의 회사가 있는 경우에만 가능하다. 이 경우 과학적 불확실성 혹은 모델 불확실성에서 차이가 발생할 수 있으나 대부분 무시할 수 있다. 통계자료 혹은 설비 정밀성 자료가 확보 가능하여 변수 불확실성 평가에 이용할 수 있는 경우(즉 전문가 판단이 필요하지 않는 경우) 정량화된 불확실성 평가는 설비들 간 비교가 가능한 것으로 취급된다. 이러한 유형의 비교가능성은 모니터링, 배출량 산정, 측정 요건들을 규정하고 있는 일종의 배출권 거래체제에서 중요하게 이용된다. 그러나, 비교 가능한 정도는 참여자들이 제공한 배출량 평가, 설비들 간의 동일성, 법규의 집행 수준, 사용된 방법론 검토와 같은 유연성체제에 의존하여 결정된다.

이러한 한계가 있음에도 불구하고, 온실가스 인벤토리를 구축함에 있어 불확실성 평가의 역할은 무엇일까? 불확실성에 대한 조사는 좀 더 폭 넓은 범위에서 인벤토리

지식에 대한 습득과 품질을 반복 검증하는 과정의 한 부분이라고 할 수 있다. 이는 기업이 온실가스 인벤토리의 불확실성을 유발하는 원인에 대한 이해를 높이고 결국 인벤토리의 품질을 보다 더 향상시킬 수 있는 기회를 제공하는 것이다. 예를 들어, 활동량 자료의 통계적 특징을 결정할 때 필요한 정보를 수집하고, 배출계수의 유효성에 대해 재차 의문을 가지며, 자료의 품질을 시스템적으로 조사하고 관리하기 위한 것 등이 이에 해당한다. 더구나 이러한 불확실성 조사는 자료 공급자들에게 다시 전달되어 이에 대한 대화를 할 수 있는 창구를 연결해 주는 역할도 할 수 있다. 또한 이러한 연결망을 통해 자료의 품질을 향상시키고, 사용된 방법론을 개선할 수 있는 기회를 만들어 낼 수 있다. 이와 유사한 효과로써, 불확실성 평가의 궁극적 목적은 아니지만 불확실성 분석결과는 검토자, 검증자 뿐만 아니라 자료원 및 방법론의 개선에 우선적 투자를 할 수 있도록 관리자에게 가치 있는 정보를 제공할 수 있다.

기업이 온실가스 인벤토리를 만들어 가는 과정에서 따르는 대부분의 불확실성 평가 유형은 배출량 산정 모델에 입력 자료로 사용된 변수(예 : 활동량, 배출계수 등)와 관련된 불확실성이 대부분을 차지한다. 변수 불확실성의 두 가지 유형은 시스템적 불확실성과 통계적인 불확실성으로 구분된다.

시스템적 불확실성은 자료에 시스템적 오류가 있을 때 발생한다. 즉, 측정된 혹은 평가된 값이 실제 값보다 평균적으로 항상 적거나 혹은 많은 경우에 발생하는 불확실성이다. 일례로, 대표성을 갖지 못하는 샘플 데이터로부터 배출계수가 도출된 경우, 관련된 모든 배출원들이 명확하게 규명되지 못한 경우, 부정확한 평가 방법 혹은 설비 측정에 오류가 있는 경우 이러한 불확실성이 증대된다. 실제 값을 알지 못하기 때문에, 시스템적 불확실성은 재실험을 통해서 검증되지 않는다, 따라서, 통계학적인 분석을 통하여 정량화 하지 못한다. 그러나, 이러한 오류를 규명하는 것은 가능하며, 때때로 데이터 품질 조사나 전문가 판단을 통해서 정량화 할 수 있는 경우도 있다. 잘 설계된 품질관리 시스템을 적용하면 시스템적 불확실성을 크게 줄일 수 있을 것이다.

전문가 판단은 그 자체가 인식오류로 불리우는 시스템적 오류원으로 볼 수 있다. 이러한 인식오류는 심리학적인 사실과 관련이 있다. 인간의 인지능력은 때때로 오판을 내린다. 특히 매우 낮거나 혹은 높은 개연성이 포함되어 있을 경우에는 더욱 그렇다. 따라서 전문가 판단을 통해 변수를 선택하고 평가하는 과정에서 인식오류가 발생할 수 있다. 인식오류를 최소화하기 위해서는 전문가에게 먼저 규명된 절차를 사용하도록 강력하게 추천해야 한다.

데이터와 관련된 시스템적 오류를 유발할 수 있는 잠재적 원인요소들을 규명하고 정성적으로 파악하는 것은 중요하다. 가능하다면, 오류의 방향(즉, 과대평가/과소평가 등을 말함) 및 상대적인 중대성도 밝혀져야 한다. 기업 인벤토리를 준비하는 데 이용된 자료들은 통계 불확실성 즉, 랜덤 불확실성에 영향을 받기 쉽다. 이러한 유형의 불확실성은 측정자의 오류, 측정기기의 오류와 같은 자연적 오류의 형태로 나타난다. 랜덤 불확실성은 실험을 되풀이 하거나, 데이터의 샘플링을 다시 함으로써 검증할 수 있다. 이상적으로는 랜덤 불확실성은 통계학적으로 이용 가능한 경험 데이터를 통해서 검증이 가능하다.

IV. 석유화학 공정분석 및 공정배출 확인

개발된 석유화학 공정의 온실가스 배출량 계산방법론, 의사결정도의 실제 적용 타당성을 검증하기 위해 10개의 조사 대상 석유화학 제품을 선정하고, 각 제품의 특성 및 제조 공정의 기능을 분석한 뒤 공정 온실가스가 배출되고 있는 설비들을 확인하였다. 현장에 설치되어 있는 온실가스 측정기, 가스 샘플 측정 장치, 설계자료, 현장 전문가 회의를 통하여 공정 온실가스가 배출되는 설비를 확인하였으며, 공정 온실가스 배출이 확인된 설비에 대해서는 신뢰도에 우선한 의사결정도에 따라 7개 공정 온실가스 배출량 계산방법론을 적용 가능성을 분석하였다.

조사 대상 제품을 선정하기 위해 먼저 국내에서 생산되는 석유화학 제품의 종류부터 조사하고, 이들 제품 중 기초유분, 합성수지, 합섬원료, 합성고무, 기타 제품의 석유화학 Upstream에서 Downstream의 순으로 국내 생산량이 많은 제품을 우선하여 선정하였다. 이를 위해 각 석유화학 제품의 생산능력과 2004년 실 생산량을 기준으로 한 생산량 통계를 조사하였고 이 중 10개 제품을 선정하였다. 이들 10개 제품은 에틸렌, 프로필렌, 혼합C4, 부타디엔, 벤젠, 톨루엔, 크실렌, EDC, VCM, SM으로 기초유분 및 합성수지(모노머) 중 시설능력 크고 생산량이 많은 제품이다.

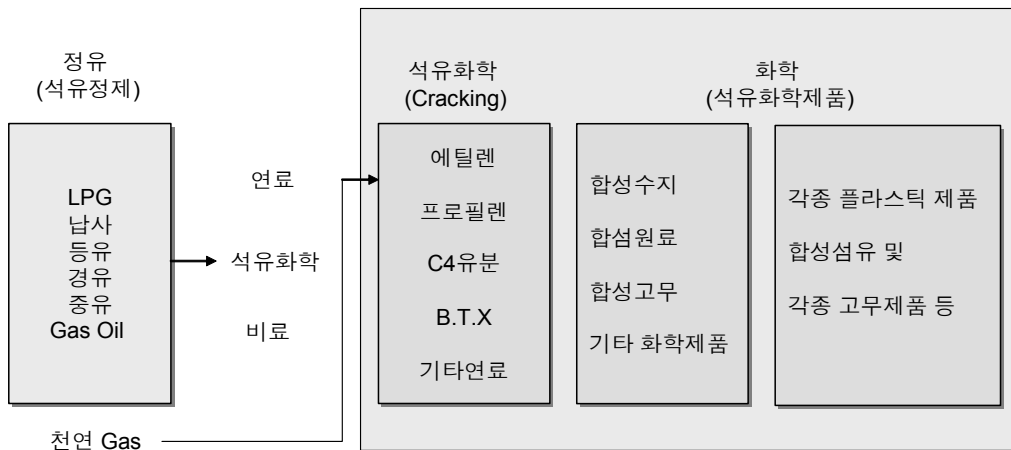
1. 석유화학 공업 개요

석유화학공업은 원유의 분류제품 중 나프타 등을 원료로 하여 석유화학 공업의 기초원료 즉, 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔 등의 저급 탄화수소²¹⁾ 및 벤젠, 톨루엔, 자일

21) Low Hydrocarbon, 탄소의 수가 작은 탄화수소

렌 등의 방향족 탄화수소²²⁾를 제조하거나, 이들 원료를 가공, 처리하여 합성수지, 합섬섬유, 합성고무, 합성세제를 비롯한 그 밖의 여러 가지 석유화학제품을 만드는 공업이다. 반면, 석유정제공업은 원유를 분류, 정제하여 가솔린, 나프타, 등유, 경유, 중유 등의 석유제품을 주로 만드는 공업을 일컫는다.

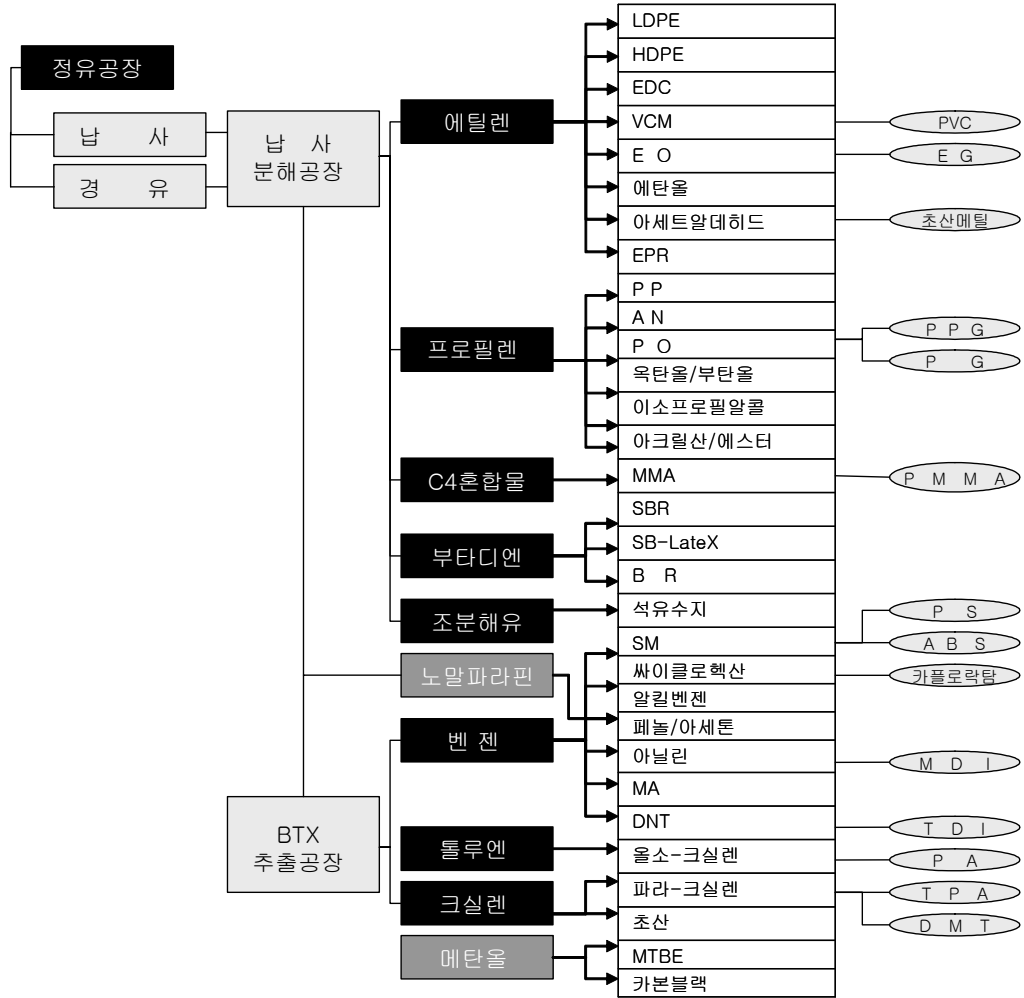
다음 [그림 IV-1]은 석유화학공업 체계를 나타낸 것이다. 정유공정에서 정제된 석유화학 원료를 석유화학공정에서 열분해하여 에틸렌, 프로필렌 등의 기초유분으로 만든 다음, 화학공정에서는 합성수지, 합섬원료 등으로 만들고, 합성수지를 이용하여 각종 플라스틱 제품을 생산한다.



[그림 IV-1] 석유화학 공업 체계

[그림 IV-2]는 석유화학 기초유분, 합성수지, 합성고무, 합섬섬유, 합성세제 등과 기타 원료, 최종제품 간의 연관성을 도식화한 것이다. 이 계통도는 원유에서 부터 최종 제품까지 원료와 제품 간의 관계를 나타내고 있다.

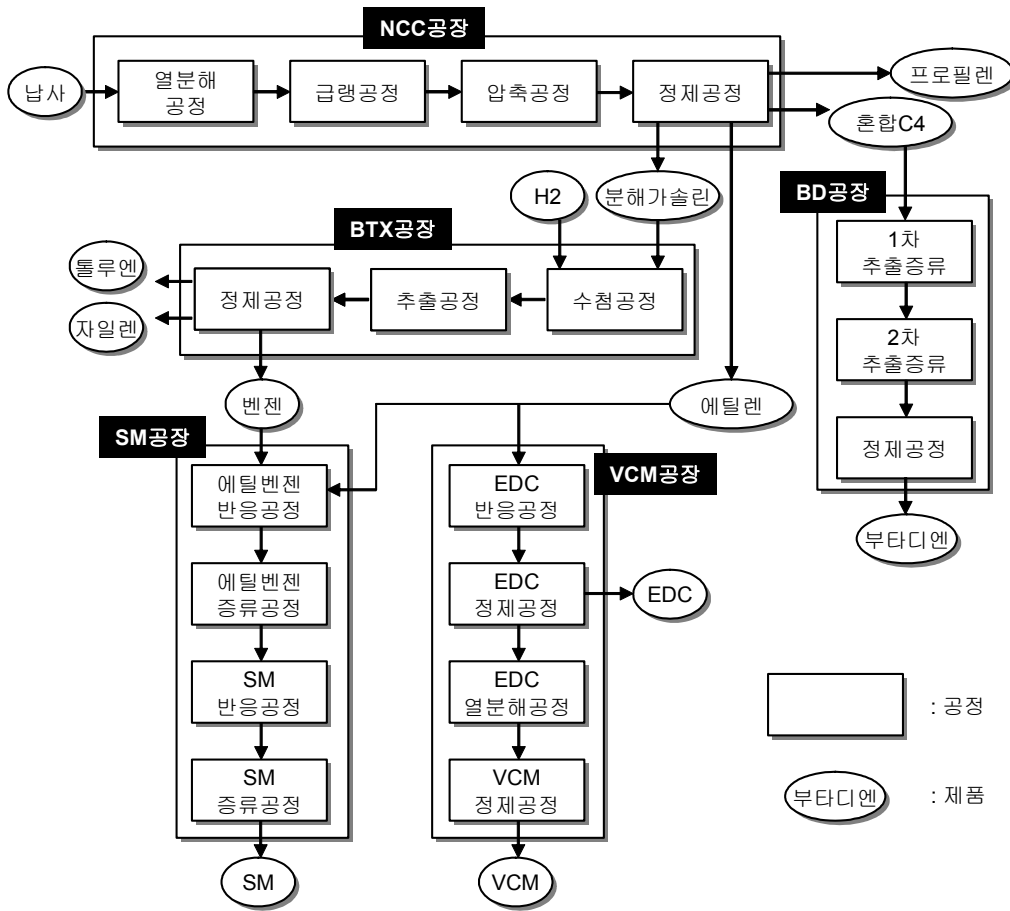
22) Aromatic Hydrocarbon, 벤젠과 벤젠 고리를 포함하는 탄화수소로써, 대부분의 화합물들이 강하고 불쾌하지 않은 향기를 가지고 있어서 방향족이란 이름이 붙었음.



[그림 IV-2] 석유화학 공업 계통도

공정분석 및 공정배출 확인 범위는 이러한 기초유분 및 모너머 중에서 국내 연간 생산량이 많은 석유화학제품 10개이다. 현장 조사 결과, 설비기준으로 볼 때 NCC공정, BTX공정, BD공정, VCM공정, SM공정의 총 5개 공정에서 조사대상 10개 제품이 생산되고 있었다. 기초 유분 중 에틸렌, 프로필렌, 혼합C4는 NCC공장에서 생산되며, 공정 온실가스는 Naphtha Cracking Furnace에서만 발생하고 있었다. 따라서, 에틸렌을 생산할 때 발생하는 공정온실가스 배출량은 NCC공정 전체를 경계로 분석해야만 의미가 있으며, 프로필렌, 혼합C4도 각각의 제품별이 아닌 NCC공정과 함께 분석하

는 것이 바람직하다. 이러한 이유로 공정분석 및 공정배출량 확인은 각 제품별이 아닌 공정별로 실시하였다. 각 생산 공정과 그에 따른 생산제품을 [그림 IV-3]에 나타내었다.



[그림 IV-3] 조사대상 10개 제품의 생산 공정 Chain

공정 분석 및 공정 배출확인과 더불어 이상의 10개 제품의 생산 공정을 보유하고 있는 석유화학 업종의 생산 공장을 방문하여 공정 온실가스가 배출되는 설비를 확인하고 본 연구에서 제시한 6개 온실가스 배출량 분석방법을 적용하여 보았다.²³⁾

23) 탄소수지법은 엄밀한 의미의 공정 온실가스 배출량 분석방법이 아니므로, 적용 가능성만 평가하고 탄소수지법을 이용한 공정배출량 계산은 수행하지 않았다.

NCC, BD, BTX, SM 제조 공정은 1개 사업장을 대상으로 조사하였고, VCM 제조 공정은 2개 공장을 대상으로 조사를 실시하였다.

분석 결과 10개 제품을 생산하는 과정에서 NCC공정의 납사 분해설비, VCM 제조공정의 EDC 반응설비, SM 제조공정의 Smart Reactor 설비의 총 3개 단위공정에서 공정 이산화탄소가 발생하는 것을 확인하였다. 배출공정 확인을 위해 공정 운전 전문가회의를 개최하는 한편, 공정 설계자료, 온실가스 측정 설비, PIS²⁴⁾ 확인 등 여러 방법을 동원하였다. NCC 공장의 DEA공정과 Caustic And Water Wash공정, VCM 공장 중 1개 공장에서는 공정에서 순환되는 공정 온실가스인 이산화탄소 제거설비가 가동되는 것을 확인할 수 있었다.

공정 온실가스가 배출되는 것으로 확인된 공정에 대해서는 본 연구에서 제시한 방법론을 이용하여 공정 온실가스 배출량을 분석가능성을 검토하였다. VCM 공장 중 1개 공장에서는 EDC 반응설비에서 발생하는 공정 온실가스를 연속적으로 측정할 수 있는 계측기가 설치되어 있었다. 그러나, 이 계측기는 온실가스 배출량 자료를 이용하여 공정의 정상운전 상태를 감시하기 위한 계측기로 배출량 계산을 위한 자료 수집원으로는 신뢰하기 어려웠다. 실제 다른 온실가스 측정 시스템을 이용하여 배출량을 측정해본 결과 연속측정 설비의 지시치와 50% 정도의 오차를 보였다. 설계 도면에 나타나 있는 온실가스 배출량과도 많은 차이를 보였다.

대부분의 석유화학 공장에서 공정 가스 중의 CO₂ 함량을 분석할 수 있는 시스템을 보유하고 있었으나, 공정가스가 흐르는 배관에서 샘플을 포집해야 하는 위험과 온실가스 관련 규제가 없는 상황에서 추가적인 측정을 위해 인력과 시간이 소요되는 것을 꺼려하는 경향이 있었다. VCM 1개 공장에서 주기측정방법을 시도해 보았으며, 신뢰로 높은 자료를 확보할 수 있었다. 다만, 상기한 바와 같은 이유로 연간 배출량을 계산할 수 있을 정도의 충분한 자료를 확보하기는 어려웠다.

24) Process Information System

여러 국제기관에서 발표된 자료에 따르면 화학양론법이 여러 업종의 공정 온실가스 배출량 계산에 유용하게 사용되고 있는 방법론 이기는 하나, 금번 조사대상 제품군 중에는 화학양론법을 적용할 수 있는 공정은 없었다. 정확한 반응식과 반응율에 따라 공정온실가스가 배출되기 보다는 촉매의 영향이나, 온도, 압력과 같은 공정 운전조건에 따라 배출량이 달라지기 때문이다.

측정배출계수법도 주기측정법에서 전술한 바와 같은 이유로 적용하기가 쉽지 않았다. 투입 산출물의 조성자료는 매우 신뢰도 높은 자료 확보가 가능하여 탄소수지법은 대부분의 공장에서 적용 가능한 것으로 분석되었다. 대부분의 석유화학 공정에서 설계배출계수법은 용이하게 적용 가능할 것으로 판단된다. 조사한 모든 공장에서 현재 운전 중인 공정의 최근 설계자료 확보가 모두 가능하였다. 에틸렌 공장은 유일하게 GL 96에서 메탄의 배출계수를 제공하고 있으므로, 공인배출계수법을 이용하여 메탄 배출량을 계산할 수 있다. 에틸렌은 NCC공정에 포함되므로, NCC 공정의 공정 온실가스 배출량을 계산할 때에는 납사분해로의 공정 이산화탄소 배출량을 계산하고, 이와 더불어 에틸렌 생산량을 기준으로 IPCC 배출계수를 적용한 메탄배출량을 계산해야 한다.

2. NCC 공정

석유의 분류제품 중 납사, 에탄, LPG등을 분해하고 분리하여 만들어내는 제품들이 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔, 벤젠 등이다. 이들 제품을 석유화학 제품을 만들기 위한 기초유분 혹은 기초원료라 일컫는다. 이 중 우리나라에서는 기초유분을 만들기 위한 원료로 주로 납사와 소량의 C4 LPG를 사용한다. 납사를 분해하여 기초유분을 만드는 공장을 NCC(Naphtha Cracking Center)라 한다. NCC공장은 납사를 고온으로 열 분해 시키는 분해공정 및 급냉공정, 압축공정, 분리정제공정으로 이루어진다.

가. 제품 개요

NCC 공정에서는 조사 대상 제품 중 에틸렌, 프로필렌, 혼합 C4가 생산된다. 이들 제품은 석유화학 공업의 대표적인 기초원료라 할 수 있다.

에틸렌($\text{CH}_2=\text{CH}_2$)는 상온 상압에서 무색 가연성 가스로 탄화수소 특유의 냄새를 가지고 있다. 산소, 염소, 염화수소, 물 등과 같은 물질과 용이하게 부가반응하여 여러 가지 유용한 물질을 형성한다. 액체상태의 비중이 0.5699이며, 비점이 -103.71°C 로 액화수송이 어려우며, 따라서 이 제품을 중심으로 석유화학공업 유도 제품공장들이 자리하게 된다. 국내에서는 LG석유화학, 삼성토탈, 여천NCC 등에서 생산하고 있다.

에틸렌은 석유화학의 가장 중요한 기본원료로써, 나프나, 가스오일을 원료로 하여 열분해에 의해 생산된다. 에틸렌을 원료로한 석유화학 제품은 고밀도 폴리에틸렌, 저밀도 폴리에틸렌, 선형저밀도 폴리에틸렌, 에틸알콜, 에틸렌글리콜 등이 있다.

<표 IV-1> 사업장별 에틸렌 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10^3ton/yr)
LG석유화학	여수	'91	760
SK	울산	'72	730
대한유화공업	온산	'91	400
삼성토탈	대산	'91	630
여천NCC	여수	'00	1,430
현대석유화학	대산	'91	1,050

프로필렌($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$)은 무색 가연성 액화가스로서 탄화수소의 특유한 냄새를 가진다. 석유화학 기초원료 중 에틸렌 다음으로 중요한 품목이며, 비점이 -47.70°C 인

상온에서 기체인 물질이다.

<표 IV-2> 사업장별 프로필렌 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
LG-Catex정유	여수	'95	175
LG석유화학	여수	'91	370
S-Oil	온산	'97	150
SK	울산	'72	485
대한유화공업	온산	'91	210
삼성토탈	대산	'91	320
여천NCC	여수	'00	750
태광산업	울산	'97	250
현대석유화학	대산	'91	500
호남석유화학	여수	'92	365
효성	울산	'91	165

프로필렌은 석유계 탄화수소의 열분해법에 의해 에틸렌을 생산할 때 부생된다. 대표적인 프로필렌 유도제품으로는 폴리프로필렌, 아세톤, 이소프로필 알콜, 프로필렌 글리콜 등이 있다.

나. 공정 개요

NCC공장은 다음의 4개 공정으로 구성되어 있다.

i) 분해 공정 : 열을 가하여 납사를 탄소 수가 적은 탄화수소로 분해하는 공정, 원료 저장 탱크에서 펌프를 통해 분해로에 도입된 원료(나프타)가 희석 증기와 함께 800℃ 이상의 고온에서 열분해반응²⁵⁾을 일으켜 여러 종류의 탄화수소 화합물이 생성

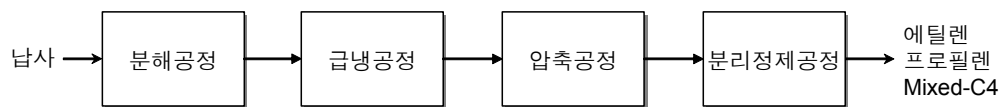
25) Thermal Cracking Reaction

되며 분해로 출구의 열을 회수하여 초고압 증기를 생산하는 공정으로 모든 제품의 수율은 분해로의 운전조건에 따라 변화된다.

ii) 급냉 공정 : 분리된 탄화수소끼리 서로 반응하지 못하도록 온도를 낮추는 공정. 분해로의 열분해 출구물질을 급냉시키지 않을 경우 증합에 의한 Coke, Tar 등을 형성하여 수율이 감소되고 기기장치의 성능을 저하시키므로 Quench Oil로 1차 냉각하여 중질 연료유를 분리해 내고 Quench Water로 2차 냉각 후 압축 공정으로 도입시킨다. 주요 기기장치의 손상을 방지하기 위해 C9+ 등을 투입한다.

iii) 압축 공정 : 분해가스의 경제적인 분리를 위해 압축하여 부피를 감소시키는 공정. 분해로 출구물질 중의 여러 가지 성분은 고압하에서만 경제적으로 분리 및 정제가 가능하기 때문에 분해가스 압축기를 이용하여 승압시키는 공정이다. 주요 기기장치의 손상을 방지하기 위하여 C9+, C9-, C10을 투입한다.

iv) 분리정제 공정 : 압축공정에서 고압으로 압축된 가스를 냉각시킨 후 비점차에 의해 단계별로 각 성분을 분리해 내는 공정으로써, 주요 제품인 에틸렌, 프로필렌과 방향족 공장의 원료인 PG 및 BD 공장의 원료인 Mixed-C4가 생산되며 부산물인 수소, 메탄 등은 연료로 사용한다.



[그림 IV-4] NCC 공정 개략도

각 공정의 주요 설비 기능은 다음과 같다.

i) Furnace Feed Reheat 설비 : 납사를 예열하여 분해로에 공급하는 공정, 분해로에 투입하기 전에 황함량 유지를 위해 DMDS(Dimethyl Disulfide)가 주입된다. 황을

주입하는 것은 분해로의 코일 재질이 Ni을 포함하고 있어서 탄화수소와 스팀을 함께 가열하게 되면 Ni이 촉매 역할을 하여 원하지 않는 Coke, CO, CO₂가 생기 때문이다. 이것들은 침탄 작용을 하여 코일의 수명을 짧게 한다. 황을 주입하면 Ni의 촉매 효과를 억제 시킨다. 황 주입량이 적은 경우에는 산성가스 제거제 및 메타네이터에 악영향을 미치고 에틸렌 수율이 약간 감소하며 메탄 수율이 증가하는 현상을 보인다.

ii) 분해 설비 : 분해로는 복사부, 대류부, 스팀 발생 장치로 구분된다. 납사는 Furnace Feed Reheat 공정에서 예열 된 후 분해로의 대류부에서 더욱 예열 된다. 이때 Dilution Steam과 혼합하기 이전에 충분히 예열 되어 부분적으로 증기화 되고 Dilution Steam과 합류하고 나면 완전히 증기화된 뒤 복사부에 유입된다. 버너를 통하여 납사를 분해하기 위한 연료가스가 공급된다. 스팀은 압력강하 및 온도 조건의 변화에 따른 수분 증발로 급속한 냉각이 발생한 경우 받을 수 있는 열 충격을 방지하기 위해 건조 상태로 공급한다. 복사관을 나온 분해로의 열분해 가스는 초고압 스팀을 생산하고 냉각공정으로 유입된다.

iii) 냉각 설비 : 분해로 분해가스의 폐열회수, PFO(Pyrolysis Fuel Oil)의 분리, 분해가스를 급냉하기 위한 설비, 탑저에서 나온 Hot Fuel Oil은 Quench Oil Filter를 거쳐 이물질 제거 후 순환되거나 일부는 PFO로 회수된다.

iv) Process Gas Compressor : PGC System의 기본 목적은 급냉계를 나오는 동안 분자량이 큰 탄화수소와 물 성분을 제거한 분해가스를 압축시키고 아직 남아 있는 물성분과 Pyrolysis Gasoline을 응축시킨 후 후속공정에서 수소 등의 가벼운 성분을 경제적으로 분리해 내는 것이다. 즉 수소, 메탄, C₄ 이하의 가벼운 성분들은 고압 저온일수록 액화가 가능해져 분리할 수 있기 때문에 냉매계통을 이용하여 얻을 수 있는 최저 온도를 고려하여 충분한 압력으로 분해가스를 압축해야 한다. 압축된 분해 가스는 수소를 분리한 뒤 계속적으로 압력을 이용해 최종 공정까지 이르는 동안 에

틸렌 및 프로필렌을 순도 높게 분리하게 된다. PGC System의 압축단 사이에는 DEA 계와 Caustic계가 설치되어 공정가스 중 산성가스(H_2S , CO_2)를 제거하며, DEA 계가 조업중지 중에도 Caustic 계만으로도 산성가스를 처리할 수 있도록 설계되어 있다.

v) DEA System : Chilling 분리 공정 전에 최종 생산물에서 문제를 발생시키는 H_2S 와 CO_2 등 Acid Gas 불순물을 공정가스로 부터 제거하는 공정, 특히 CO_2 는 저온 계통에서 응결되어 Plugging을 일으키고 열전달을 방해할 수 있다. 유입된 공정가스는 DEA Absorber에서 Reversible 화학반응에 의해 H_2S , CO_2 가 DEA와 결합하여 Rich DEA 상태로 Gasoline/DEA Contactor로 유입된다. Acid Gas가 제거된 공정가스는 Caustic and Water Wash System으로 유입된다.

vi) Caustic and Water Wash System : DEA System을 지난 공정가스 속에 남은 잔여 Acid Gas(H_2S 와 CO_2)를 제거하기 위한 공정, DEA 계통을 100% Back-Up하도록 되어 있어서 DEA System 보수 필요 시 By Pass할 수 있다. 모든 Acid Gas는 Caustic and Water Wash System에서 제거된다.

vii) Dryers : 수분을 흡착 건조하는 공정, 공정 가스 중에 수분이 남아 있게 되면 Chilling 계통에서 수화물이 형성되어 얼거나 결정화되어서 흐름을 방해하므로 수분을 제거 하는데 목적이 있다. 흡착되는 물질의 농도 및 압력에는 비례하지만 온도에는 반비례하며 물이 H.C 보다 더 큰 극성이므로 더 강하게 흡착한다. 또한 흡착은 열을 방출하고 탈착은 열을 필요로 한다.

viii) Demethanizer System : 압축한 후 수분이 제거된 공정가스에서 원하는 제품을 경제적으로 분리해 내기 위해서 저온 정류 과정을 거치는 공정, 압축, 건조된 공정가스 중에서 수소 및 메탄 가스를 C_2+ 이상의 중질 성분으로부터 분리해 내는데 목적이 있다.

ix) C2정제설비 : 공정으로 유입된 Feed를 에틸렌과 에탄으로 분리하는 공정

x) C3정제공정 : 공정으로 유입된 Feed 중 프로필렌을 정제하는 공정

xi) C4분리공정 : 공정으로 유입된 Feed 중 Mixed-C4를 분리하는 공정

다. 공정배출량 발생 위치 확인

조사대상 업체의 NCC 공정에 대한 온실가스 공정배출량 발생여부 확인 결과 분해공정의 분해로에서 화학반응에 의한 공정 이산화탄소가 발생되고 있었다. 분해로에서 발생하는 공정 온실가스는 납사의 분해과정 중에 미량의 산소와 탄소가 반응하여 발생한다. CO₂ 배출량을 측정할 수 있는 별도의 계측기는 설치되어 있지 않았고, 현장 전문가의 조언 및 설계자료를 통하여 공정 이산화탄소 배출을 확인하였다.

설계자료를 기준으로 한 분해로의 투입·산출물 목록은 <표 IV-3>과 같다. 분해로는 납사와 Dilution Steam이 유입된다. 830~840℃에서 열분해가 일어나면 납사는 다양한 C,H 복합물로 분해되며, 소량의 CO₂가 생성된다. 또한 CO₂ 전구(前驅)물질인 일산화탄소도 이산화탄소의 약 1.7배(질량 기준) 가량 발생한다.

<표 IV-3> 납사 분해로의 투입·산출물 종류

		분해로	
		투입물	산출물
성 분	HC	✓	
	H ₂ O	✓	
	H ₂		✓
	CO		✓
	CO ₂		✓
	CH ₄		✓
	C ₂ H ₂		✓
	C ₂ H ₄		✓
	C ₂ H ₆		✓
	C ₃ H ₆		✓
	C ₃ H ₈		✓
	C ₄ H ₆		✓
	C ₄ H ₈		✓
	C ₄ H ₁₀		✓

분해로에서 발생한 공정 온실가스 이산화탄소는 DEA Absorber와 Caustic And Water Wash Tower에서 전량 제거된다. 이 두 공정은 반응공정의 촉매활동을 방해하는 물질인 CO₂와 H₂S를 제거하는 공정이다. 설계치 기준 이산화탄소 제거율은 100%이다. DEA Absorber 및 Caustic And Water Wash Tower의 투입물 산출물 종류는 <표 IV-4>와 같다. 표의 투입 산출물 종류에서 알 수 있듯이 CO₂와 H₂S가 전량 제거되고 있다.

<표 IV-4> DEA Absorber 및 Caustic and Water Wash Tower의 투입·산출물 종류

		DEA Absorber Caustic and Water Wash Tower	
		투입물	산출물
성 분	H ₂	✓	✓
	CO	✓	✓
	CO ₂	✓	
	H ₂ S	✓	
	CH ₄	✓	✓
	C ₂ H ₂	✓	✓
	C ₂ H ₄	✓	✓
	C ₂ H ₆	✓	✓
	C ₃ H ₆	✓	✓
	C ₃ H ₈	✓	✓
	C ₄ H ₆	✓	✓
	C ₄ H ₈	✓	✓
	C ₄ H ₁₀	✓	✓

라. 공정배출 분석방법론 적용

공정배출이 확인된 NCC공정의 분해로에 대해 본 연구에서 개발된 7가지 공정 온실가스 배출량 분석방법을 적용해 보았다. 동일 NCC 공정이라도 사업장의 현황에 따라 적용할 수 있는 방법의 종류가 다를 것이다. 여기에서 제시되는 방법론별 적용 가능성 평가는 조사 대상 사업장에만 해당되며, 국내 모든 NCC 공정의 적용가능성으로 대표성을 갖는 것은 아니다.

조사대상 사업장의 NCC공정에는 온실가스 측정기기가 설치되어 있지 않아 연속 측정방법은 적용할 수 없다. 가스 샘플 측정에 의한 주기측정법 및 측정배출계법은 샘플측정 위치 확보 문제로 적용이 어렵다. 분해로 내부에서 발생하는 이산화탄소는 투입물질의 정확한 반응 상관관계를 규명하기 어렵고, 분해로 내부의 온도, 압력 조

건과 투입물질량에 따라 변경되므로 화학양론법도 적용하기 어렵다. 예를 들어, 분해로의 코일 재질이 Ni를 포함하고 있어서 탄화수소와 스팀을 함께 가열하게 되면 Ni이 촉매 역할을 하여 원하지 않는 Coke, CO, CO₂가 생기고, 이 물질들의 발생량을 억제하기 위해 분해공정으로 납사를 공급하기 전에 황을 주입한다. 따라서 주입되는 황의 함량에 따라 공정 이산화탄소 발생량은 2차적인 영향을 받는다.

석유화학 공정은 투입물 및 산출물의 성분 자료의 신뢰도가 높으므로 탄소수지법은 적용가능하다. 조사 대상업체의 NCC 공정에서는 분해로에서 발생한 공정 이산화탄소가 DEA Absorber와 Caustic And Water Wash Tower에서 전량 분해되므로 순 공정온실가스 배출량은 “0”의 값을 갖는다. 그러므로 이 사업장에 탄소수지법을 적용하여 도출된 이산화탄소 배출량은 각종 소각설비 및 부생물질 에너지 전환설비에서 연소반응을 통해 배출되는 온실가스만 포함하게 된다.

신뢰도 높은 설계자료의 확보가 가능하여 설계배출계수법이 적용 가능하였으며, GL 96에 제시된 공정 메탄배출계수를 이용하여 에틸렌 생산량 기준으로 공정 온실가스 배출량을 계산할 수 있다. GL 96에서 제시한 메탄의 공정배출계수는 1(gCH₄/kgEthylene)이다.

<표 IV-5> 조사대상 NCC 분해설비의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성

측정방법	적용가능성	근거
연속측정	불가	온실가스 측정기기 없음
주기측정	불가	측정위치 확보 어려움
화학양론	불가	반응식에 의한 배출량 입증 어려움
측정배출계수	불가	측정위치 확보 어려움
탄소수지	가능	적용가능하나 분석대상에서 제외
설계배출계수	가능	신뢰성 있는 설계자료(PFD) 보유
공인배출계수	가능	IPCC에서 에틸렌의 CH ₄ 배출계수 제공

3. BTX 공정

BTX 제조 공정은 NCC에서 생산되는 분해가솔린을 원료로 벤젠, 톨루엔 및 크실렌을 추출과 증류를 이용하여 분리정제하는 공정이다. 이 공정은 원료인 분해가솔린을 수첨시키는 공정과 용해도 차이를 이용한 추출공정, 비점차를 이용하는 증류 정제 공정으로 구성되어 있다. 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 생산하며, 부제품으로 혼합 C5류, C9+ 및 Non Aromatics 등이 생산된다.

가. 제품 개요

화학식이 C_6H_6 인 벤젠은 끓는점 $80.099^{\circ}C$, 분자량 78.11, 비중 0.879인 특이한 냄새가 있는 무색의 액체로써, 독성 및 인화성이 강하다. 에틸렌과 반응하여 PS/ABS의 원료인 SM을 생산할 때 이용된다. 페놀 제조용으로 사용되며, 카프로락탐의 원료인 사이클로 헥산 제조용으로 사용된다. GS-Caltex 정유, LG석유화학 등에서 생산된다.

벤젠은 방향족 탄화수소 중 가장 핵심적인 석유화학 기초원료로써, 과거에는 주로 석탄에서 얻었으나 현재는 대부분 석유에서 얻는다. 정유공장 개질유로부터 주로 많이 생산하고, 다음이 Olefin Plant의 분해가솔린으로부터 톨루엔, 자일렌과 함께 생산한다. 전처리를 끝낸 분해유를 용제추출법을 사용하여 분리한다.

<표 IV-6> 사업장별 벤젠 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
GS-Catex정유	여수	'95	175
LG석유화학	여수	'91	370
S-Oil	온산	'97	150
SK	울산	'72	485
대한유화공업	온산	'91	210
삼성토탈	대산	'91	320
여천NCC	여수	'00	750
태광산업	울산	'97	250
현대석유화학	대산	'91	500
호남석유화학	여수	'92	365
효성	울산	'91	165
호남석유화학	여수	'92	140

화학식이 C₇H₆인 톨루엔은 분자량 92, 비중이 0.87이며, 벤젠향을 가진 무색의 액체로 공기보다 무겁고 인화성이 높다. 독성은 벤젠의 10% 수준이다. 도료, 고무 및 접착제의 용제로 많이 사용되며 석유화학제품 원료로 쓰인다. 나프타를 원료로 하는 BTX 분해공장에서 통상 벤젠, 자일렌과 함께 제조된다. BTX 공장에서 탈알킬 또는 불균화 반응을 통해 벤젠이나 자일렌으로 전환하기도 한다. GS-Caltex 정유, LG석유화학 등에서 생산된다.

<표 IV-7> 사업장별 톨루엔 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
LG-Catex정유	여수	'90	700
LG석유화학	여수	'92	85
S-Oil	온산	'91	274
SK	울산	'70	329
동양제철화학	광양	'95	20
여천NCC	여수	'00	193
인천정유	인천	'96	250
호남석유화학	여수	'92	60

화학식이 C₈H₁₀인 자일렌은 방향성 액체로 Diesel과 비슷하다. 독성은 벤젠의 10% 수준이다. 가소제나 폴리에스테르섬유 등의 원료로 사용된다. 3종의 이성체(올소크실렌, 파라크실렌, 메타크실렌)의 혼합물로 혼합자일렌이라고 하는 무색의 액체로써, 물에는 녹지 않고 알코올 및 에테르에는 쉽게 녹는다. GS-Caltex 정유, LG석유화학 등에서 생산된다.

<표 IV-8> 사업장별 자일렌 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
LG-Catex정유	여수	'90	1,030
LG석유화학	여수	'92	42
S-Oil	온산	'91	473
SK	울산	'70	429
여천NCC	여수	'00	119
인천정유	인천	'92	400
호남석유화학	여수	'92	40

나. 공정 개요

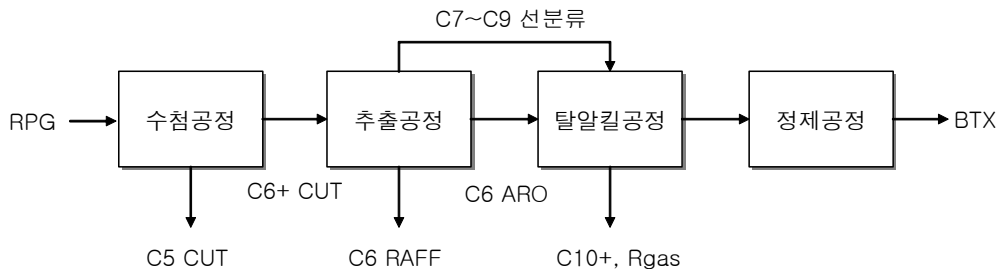
BTX 제조 공정은 수첨공정, 추출공정, 탈알킬화공정, 분리공정의 4개 공정으로 구성되어 있다.

i) 수첨공정 : 열분해 가솔린(Pyrolysis Gasoline) 수첨공정으로 C5+ 이상의 H, C 원료를 2단계의 수소첨가 반응(2기의 촉매 반응기 사용)을 거쳐 완전 수첨시켜 C5 제품 및 C6+ 제품을 분리 생산하는 공정

ii) 추출공정 : 가솔린 수첨공정으로부터 생산된 C6+ 제품을 이용하여 선분류공정을 통해 C6 Cut와 C7+ 제품으로 분리한 후 추출공정에서 낮은 온도의 선택성이 좋은 용매를 사용하여 C6 CUT를 원료를 방향족성분과 비방향족 성분으로 분리한다.

iii) 탈알킬화공정 : 추출공정의 선분류 공정으로부터 분리된 C7~C9 제품을 원료로 하여 수소 존재 하에서 고온, 고압 Cracking의 탈알킬화 반응주제품인 벤젠을 생산하며, Cracking 과정에서 부산물로 Fuel Gas를 생산한다.

iv) 정제공정 : 탈알킬화공정의 제품인 방향족 혼합물 원료를 이용하여 각 성분의 비점차를 이용하여 고순도의 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 생산하는 정제 공정이다.



[그림 IV-5] BTX 제조공정 개략도

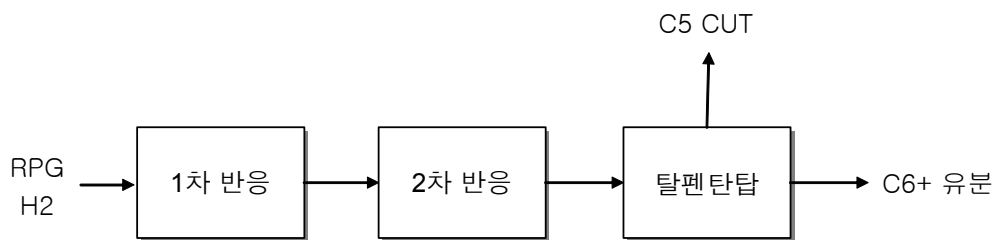
1) 수첨공정

조사 대상업체의 수첨공정은 1차 반응기, 2차 반응기, 탈펜탄탑으로 구성되어 있다.

i) 1차 반응기 : RPG(NCC에서 생산한 열분해 가솔린) 중의 불포화탄화수소를 포화탄화수소로 전환하기 위해 Pd(팔라듐)촉매를 이용하여 1차 수첨반응을 시키는 공정, 완전수첨시 생성되는 과도한 반응열 생성을 막기 위해 선택적 수첨반응을 함

ii) 2차 반응기 : 1차 수첨반응시 미수첨된 Olefin계 H.C를 Paraffin(포화탄화수소)으로 전환하고 원료중의 황 화합물을 H₂S로 전환시켜 제거하는 공정

iii) 탈펜탄탑 : 1, 2차 반응기를 거쳐 완전히 포화탄화수소로 전환된 유분을 C5 Cut, C6+ 이상으로 분별증류 후 C6+는 벤젠생산을 위한 선분류공정으로 공급하고, C5 Cut는 타 공정의 원료로 공급



[그림 IV-6] 수첨공정 개략도

2) 추출공정

조사 대상업체의 추출공정은 탈헥산탑, 탈노난탑의 선분류공정과 추출탑, 분리탑,

회수탑의 추출공정으로 구성되어 있다.

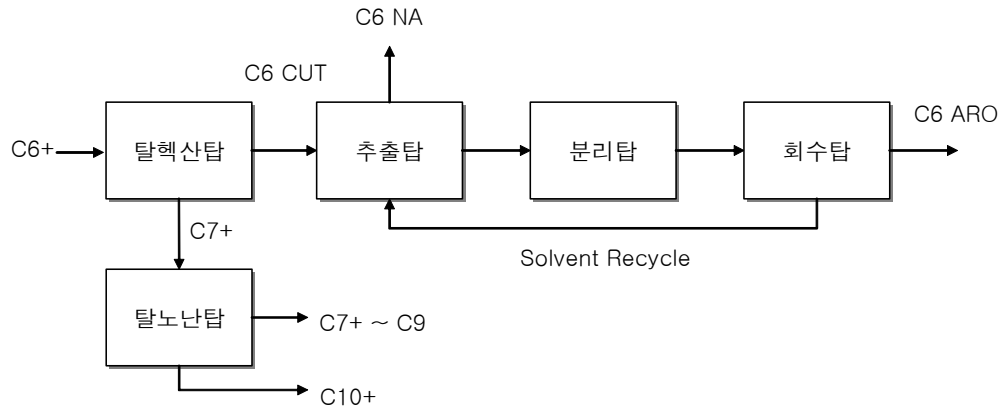
i) 탈핵산탑 : 수첨공정에서 생산된 C6+를 선분류하여 C6 Cut 성분은 추출공정으로 공급하고 탑저 물질은 탈노난탑으로 공급하는 공정, 벤젠탄소수가 6개 이므로 C6 Cut 중 방향족물질만을 효과적으로 추출하면 선분류공정으로 통해 중간제품상태의 벤젠을 얻을 수 있음

ii) 탈노난탑 : 탈핵산탑에서 공급된 C7+ 중 C7+~C9 성분은 탈알킬화 공정으로 공급되고 탑저물질인 C10+는 타 공정의 연료로 공급하는 공정

iii) 추출탑 : 선분류공정에서 공급된 C6 Cut 성분은 방향족화합물에 대한 용해도와 선택도가 뛰어난 Solvent 용제를 이용, Aromatic을 추출하고 용해되지 않은 추잔물은 부산물로 처리

iv) 분리탑 : 추출과정 중 Solvent 중에 일부 용해된 비방향족 화합물을 제거하는 공정

v) 회수탑 : Aromatic 성분을 추출하고난 Rich Solvent에서 Aromatic과 Solvent를 재분류하여 추출공정의 제품인 C6 ARO를 생산하고 회수된 Solvent는 몇 차례의 열교환을 통해 냉각된 후 추출탑으로 재순환됨. C6 ARO는 저장 탱크를 거쳐 벤젠제품 공정으로 보내짐



[그림 IV-7] 추출공정 개략도

3) 탈알킬공정

조사 대상업체의 탈알킬공정은 가열기, 반응기, 기액분리기, 안정화탑, 흡착탑으로 구성되어 있다.

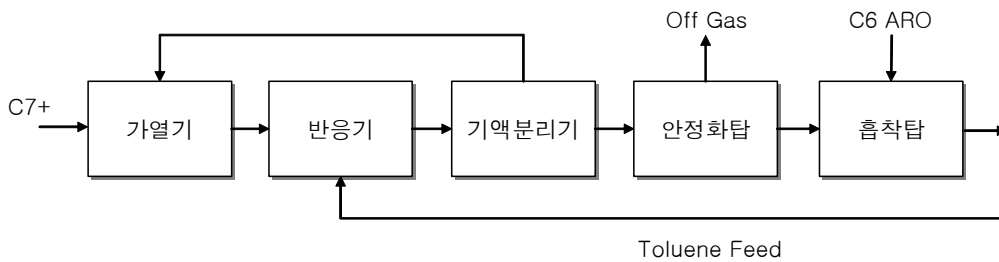
i) 가열기 : 선분류공정에서 공급된 C7+는 반응기의 유출물에 의해 예열된 후 당 생산공정의 특징인 벤젠 최대생산을 위한 탈알킬화 공정의 운전조건으로 승온하는 공정

ii) 반응기 : 승온된 Feed는 무촉매 반응기에서 고온에 의한 수소부가 반응을 알킬기가 제거되어 벤젠성분으로 전환되고 비방향족은 수소 Cracking에 의해 Fuel Gas로 전환하는 공정

iii) 기액분리기 : 벤젠성분으로 전환된 고온의 유분을 냉각시켜 안정화탑으로 공급하고 기체상태의 Fuel Gas는 부산물로 생산하는 공정

iv) 안정화탑 : 분리탑에서 공급된 유분 중에 포함된 H₂S 및 Light 성분을 제거함

v) 흡착탑 : 안정탑에서 불순물이 제거된 유분과 추출공정 중간제품인 C6 ARO 중에 포함된 미량의 불포화 탄화수소를 제거하고 최종제품탑인 벤젠탑으로 보낸다.



[그림 IV-8] 탈알킬공정 개략도

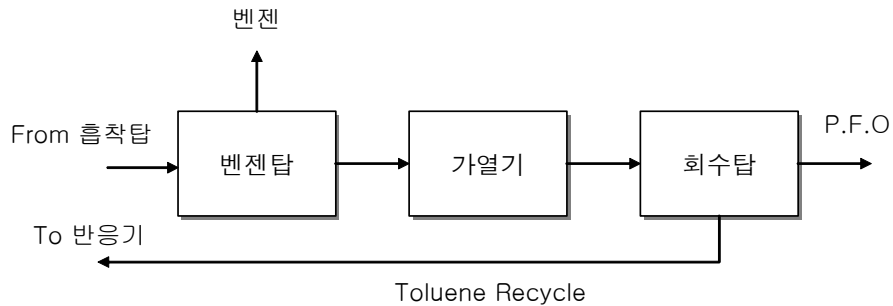
4) 정제정공

조사 대상업체의 정제공정은 벤젠탑, 가열기, 회수탑으로 구성되어 있다.

i) 벤젠탑 : 주생산품인 벤젠을 생산하는 제품탑으로 고순도의 벤젠을 증류생산하고 탑저물질인 톨루엔 이상 성분은 재회수를 위해 회수탑으로 보내는 공정

ii) 가열기 : 톨루엔 이상 고비점 물질을 분리조작에 필요한 온도까지 승온하는 공정

iii) 회수탑 : 톨루엔 이상 물질을 회수하여 공정내에 재도입하고, C10+ 이상 고비점 물질은 PFO로 처리하는 공정



[그림 IV-9] BTX 정제공정 개략도

다. 공정배출량 발생 위치 확인

공정전문가 회의 및 Process 설계자료 검토 결과 BTX 생산 공정에서는 공정 온실가스 배출 설비가 없는 것으로 확인되었다.

라. 공정배출 분석방법론 적용

BTX 제조 공정에서는 공정 온실가스 배출이 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 일부 공정부생물들은 소각 및 에너지원으로 사용되고 있으며, 탄소수지 방법을 이용하면 이러한 에너지원의 연소에 의한 온실가스 배출량과 소각부문의 배출량을 계산할 수 있다.

4. BD 공정

NCC에서 부생된 Mixed-C4(혼합 C4유분)는 Butane(C_4H_{10}), Butene(C_4H_8), Butadiene(C_4H_6), Iso-Butene 이 혼합되어 있는 화합물이다. 부타디엔 제조 공정은 NCC 공정에서 생산되는 혼합 C4유분 중에 포함되어 있는 부타디엔을 추출 솔벤트

인 DMF(Dimethyl Formamide)를 사용하여 추출과 증류를 이용하여 부타디엔을 분리 생산하는 공정이다. 부타디엔을 분리하고 남은 Mixed-C4는 추가 분리공정을 거쳐 Iso-Butene , Normal Butene, Butane으로 분리, 생산한다.

가. 제품 개요

화학식이 C_4H_6 인 부타디엔은 끓는점 $-4.4^\circ C$, 분자량 54.09인 상온 상압에서 무색 가연성 가스로써 강한 중합성을 띄며 산소와 접촉시 과산화물을 생성, 폭발 위험이 있는 물질이다. 비점이 낮고 중합성이 강해 수송 및 저장이 어렵다. 부타디엔의 유도 품으로는 BR, SBR, SB-Latex 등의 합성고무 등이 있으며, ABS, MBS 수지 생산용으로 대부분 사용된다. 기타 Adipic Acid 등 Chemicals 제조용으로 사용된다. 부타디엔을 분리하고 남은 Mixed-C4는 추가 분리공정을 거쳐 Iso-Butene, Normal Butene, Butane으로 분리, 생산한다.

Iso Butene → MMA → PMMA → 광학, 기계, 의료, 전기제품

Normal Butenes → 2PH → 가소제

부타디엔은 GS-Caltex 정유, LG석유화학 등에서 생산된다.

<표 IV-9> 사업장별 부타디엔 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
LG-Catex정유	여수	'95	175
LG석유화학	여수	'91	370
S-Oil	온산	'97	150
SK	울산	'72	485
대한유화공업	온산	'91	210
삼성토탈	대산	'91	320
여천NCC	여수	'00	750
태광산업	울산	'97	250
현대석유화학	대산	'91	500
호남석유화학	여수	'92	365
효성	울산	'91	165

나. 공정 개요

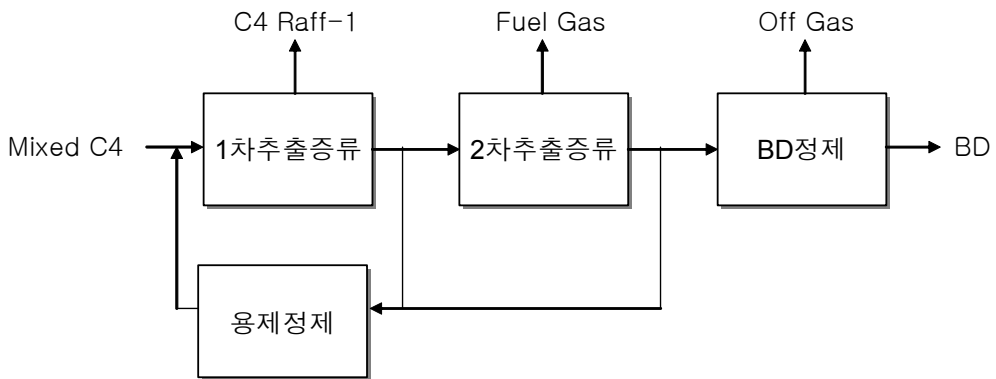
부타디엔 제조 공정은 1차 추출증류공정, 1차 추출증류공정, BD정제공정, 용제정제공정의 4개 공정으로 구성되어 있다. BD 공장의 원료는 NCC공장으로 부터 Mixed-C4를 공급받아 사용하며, Mixed-C4 중 1.3-Butadiene을 추출하는 공정으로 추출용제인 DMF(Dimethyl Formamide)를 사용하여 주제품인 1.3-Butadiene을 고순도로 만드는 공정이다. 부산물로서는 C4 Raffinate-1을 생산하여 연계공장의 원료로 사용되며, Fuel Oil, Fuel Gas도 생산되어 보일러의 연료로 사용된다. C4 Raffinate-1은 Mixed-C4 중 1.3-Butadiene을 제외한 나머지 혼합물을 말한다.

i) 1차 추출증류공정 : 1차 추출증류공정에서는 1.3-Butadiene보다 휘발도가 높은 성분인 Butane-Butene류 들이 제거된다. 대부분의 T-2-Butene 및 일부 C-T-Butene이 제거되며 1차 Stripping Column에서 솔벤트와 Crude BD를 분리하여 BS가스 압축기로 압축하여 2차 추출증류공정으로 이송된다.

ii) 2차 추출증류 공정 : 2차 추출증류공정에서는 DMF에서 1.3-Butadiene보다 더 잘 용해되는 성분인 비닐 아세틸렌, 에틸 아세틸렌, 1.2-Butadiene 및 C5 혼합물 등이 제거되며, BD와 상대 휘발도가 비슷한 메틸 아세틸렌은 BD 정제공정에서 제거된다.

iii) BD정제공정 : 1차, 2차, 3차 정제탑으로 구성되어있으며, 1차 정제탑에서 메틸 아세틸렌 및 수분이 제거되고, 2차 정제탑에서는 추출증류공정에서 제거되지 않은 C-2-Butene, 1.2-Butadiene, 에틸아세틸렌 및 C5 혼합물이 제거된다. BD 제품의 중합방지를 위해 1차 및 3차 정제탑 상부로 중합방지제를 투입한다.

iv) 용제정제공정 : 순환되는 솔벤트의 일부분을 1차 및 2차 추출증류공정의 Stripper로 부터 공급받아 솔벤트중의 C4 H.C, BD-Dimer 및 물 등을 제거하여 솔벤트 펌프의 Seal로써 사용하거나 하거나 Solvent Surge Tank로 이송하여 1차 및 2차 추출증류공정으로 재순환된다.



[그림 IV-10] BD 제조공정 개략도

다. 공정배출량 발생 위치 확인

공정전문가 회의 및 Process 설계자료 검토 결과 부타디엔 생산 공정에서는 공정 온실가스 배출 설비가 없는 것으로 확인되었다.

라. 공정배출 분석방법론 적용

부타디엔 제조 공정에서는 공정 온실가스 배출이 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 일부 공정부생물들은 소각 및 에너지원으로 사용되고 있으며, 탄소수지 방법을 이용하면 이러한 에너지원의 연소에 의한 온실가스 배출량과 소각부문의 배출량을 계산할 수 있다.

5. VCM 공정

공정조사 대상 범위에는 EDC와 VCM이 각각 별도의 조사 대상 범위로 설정되어 있으나, 현장 조사를 실시한 2개 사업장에서 EDC 생산설비와 VCM 생산설비가 연속 공정으로 구성되어 있고, 1개의 공장단위로 분류하여 관리하고 있었다. 따라서, EDC 생산공정과 VCM 생산공정을 하나의 공정으로 분석하였다. 연속된 공정이라도 EDC를 별도로 제품으로 판매하는 사업장도 존재하므로, EDC 반응공정과 EDC 정제 공정을 EDC 생산공정으로, EDC 분해공정과 VCM정제공정을 VCM 생산공정으로 분리하여 분석하는 것도 가능하다.

가. 제품개요

EDC(Ethylene Di-chloride, 이염화에틸렌)은 화학식이 $\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{Cl}$ 인 무색의 가연성 액체로 크로로포름과 같은 냄새와 단맛이 있고, 내연성이며 염화비닐모너머 제조용으로 사용된다. 주원료로는 에틸렌이 사용되고 한화석유화학, LG화학에서 생산하고 있다.

<표 IV-10> 사업장별 EDC 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (103ton/yr)
LG화학	여수	'96	250
한화석유화학	여수,울산	'80,'91	580

EDC공장은 원료인 에틸렌과 염소의 수송에 제약을 받으므로 입지조건상 원료확보가 용이하여야 하며 석유화학계열의 한 Flow를 이루고 있는 기초소재이다.

VCM(Vinyl chloride monomer, 염화비닐모너머)은 범용 합성수지인 PVC(Poly Vinyl Chloride)의 원료이며, EDC(Ethylene Di-chloride)는 VCM의 원료로써 두 제품의 생산설비는 각각의 설비를 별도로 건설하기도 하나 최근에는 EDC로 부터 VCM(또는 PVC)에 이르기까지 일괄생산체제로 건설하는 것이 일반적이다.

<표 IV-11> 사업장별 VCM 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (103ton/yr)
LG화학	여수, 대산	'90, '97	900
한화석유화학	울산, 여수	'72, '79	516

나. 공정 개요

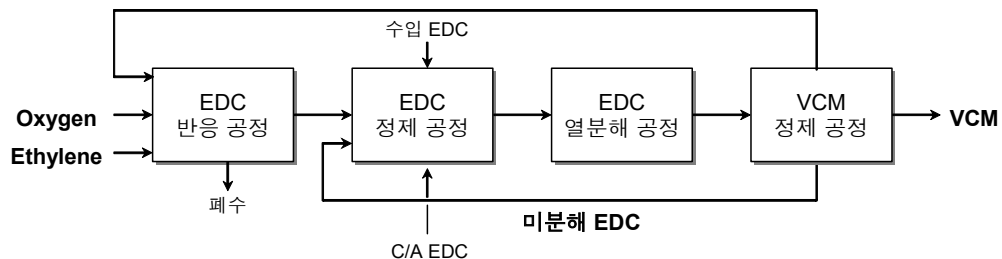
EDC 및 VCM을 생산하는 공정은 다음의 4단계로 구성되어 있다.

i) EDC 반응공정 : 에틸렌, 산소, 염산의 원재료를 이용하여 EDC를 합성하는 공정, Oxy Reactor, Hot Quench Col., Crude EDC Condenser, Air / R.G. Compressors의 단위공정으로 구성되어 있다.

ii) EDC 정제공정 : Crude EDC중의 경질물 및 중질물을 제거하여 열분해로에 공급되는 순수 EDC를 제조하는 공정, Heads / Hiboil / Vacuum / Dewatering Columns, HTDC Compressor의 단위공정으로 구성되어 있다.

iii) EDC 열분해공정 : 약 490℃의 온도로 EDC를 열분해하여 VCM, HCL 및 미분해 EDC를 생성하는 공정, EDC Pyrolysis Furnace, Transfer Line Exchanger, Quench Scrubber의 단위공정으로 구성되어 있다.

iv) VCM 정제공정 : 분해된 혼합물을 정제하여 HCL과 미분해 EDC를 각각 EDC 반응공정과 정제공정으로 보내고, 순수한 VCM을 제조하는 공정. HCL / VCM Columns, VCM Stripper, Refrigerant Compressors의 단위공정으로 구성되어 있다.



[그림 IV-11] EDC 및 VCM 공정 개략도

1) EDC 반응공정

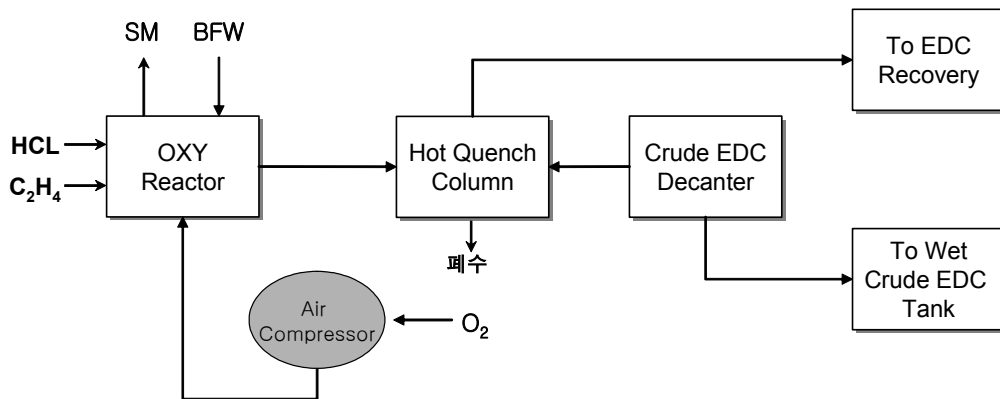
조사 대상업체의 EDC 반응공정은 Oxy Reactor, Air Compressor, Hot Quench Column, Crude EDC Decanter의 4개 설비로 구성되어 있다.

i) Oxy Reactor : 에틸렌, 산소, 염산으로 EDC 합성하는 공정, Cooling Coil에서 반응열을 회수하여 스팀 생산, 유동성 촉매층에서 반응

ii) Air Compressor : 공기를 압축하여 반응에 필요한 산소 공급하는 공정, 촉매가 유동할 수 있는 Motive 제공

iii) Hot Quench Column : 생성된 EDC를 급냉시켜 EDC중의 HCL과 H₂O를 제거하는 공정

iv) Crude EDC Decanter : 비중의 차이를 이용하여 EDC 중의 물을 분리하는 공정, 분리된 물은 Hot Quench Column으로 Reflux됨.

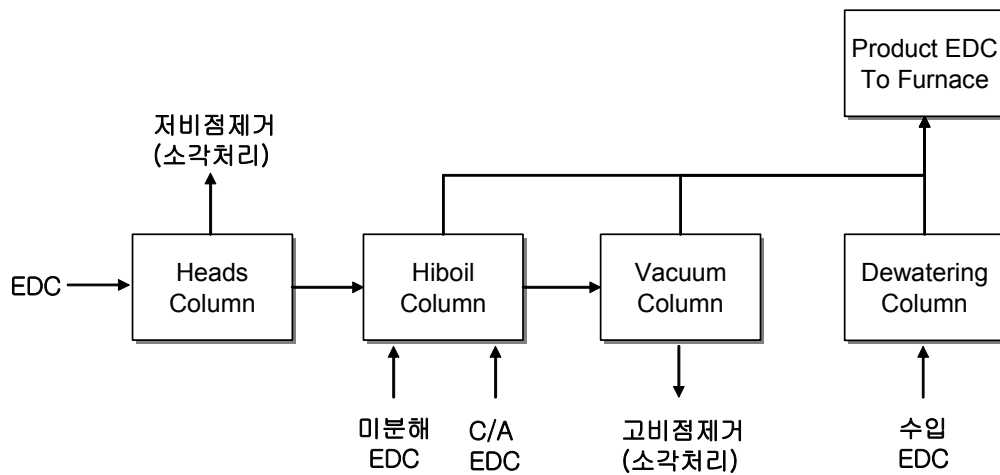


[그림 IV-12] EDC 반응공정 개략도

2) EDC 정제과정

조사 대상업체의 EDC 정제과정은 Heads Column, Hiboil Column, Vacuum Column, Dewatering Column의 4개 설비로 구성되어 있다.

- i) Heads Column : 탑상부로 EDC중 경질물 및 수분을 제거하는 공정
- ii) Hiboil Column : EDC중의 중질물 제거 하여 순수 EDC를 제조하는 공정
- iii) Vacuum Column : 중질물을 재증류하여 EDC를 최종 추출하는 공정
- iv) Dewatering Column : 수입 EDC 중의 수분 제거하는 공정



[그림 IV-13] EDC 정제과정 개략도

3) EDC 열분해과정

조사 대상업체의 EDC 반응공정은 Furnace, Vaporizer, Transfer Line Exchanger,

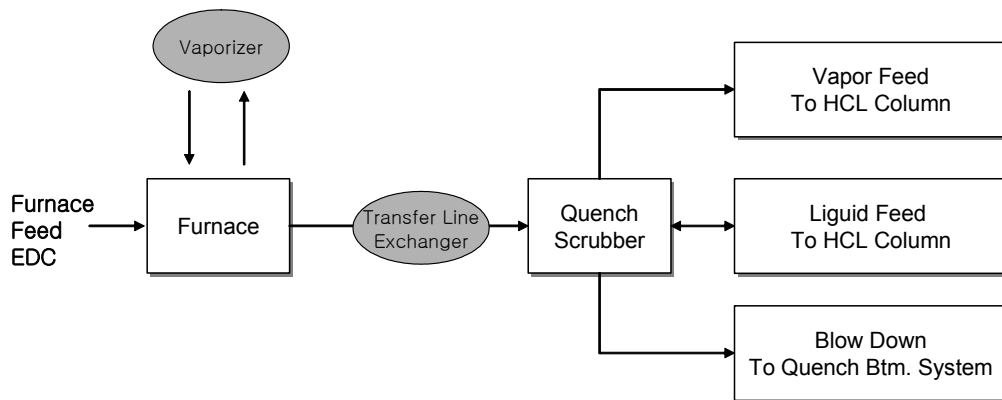
Quench Scrubber의 4개 설비로 구성되어 있다.

i) Furnace : 약 490℃의 온도에서 EDC를 열분해하여 VCM을 생성하는 공정

ii) Vaporizer : Liquid EDC를 기화시켜 Furnace에 공급하는 공정

iii) Transfer Line Exchanger : 1공장과 2공장에서이 역할이 다소 상이함. 1공장에 서는 Furnace Effluent와 열매체(Hot Oil)를 열교환하여 Heat Source로 재순환시키고, 2공장에서는 Furnace Effluent를 이용하여 스팀을 생성함

iv) Quench Scrubber : 고온의 Furnace Effluent를 급랭시키는 공정. Carry over되 는 Carbon Particle 제거



[그림 IV-14] EDC 열분해공정

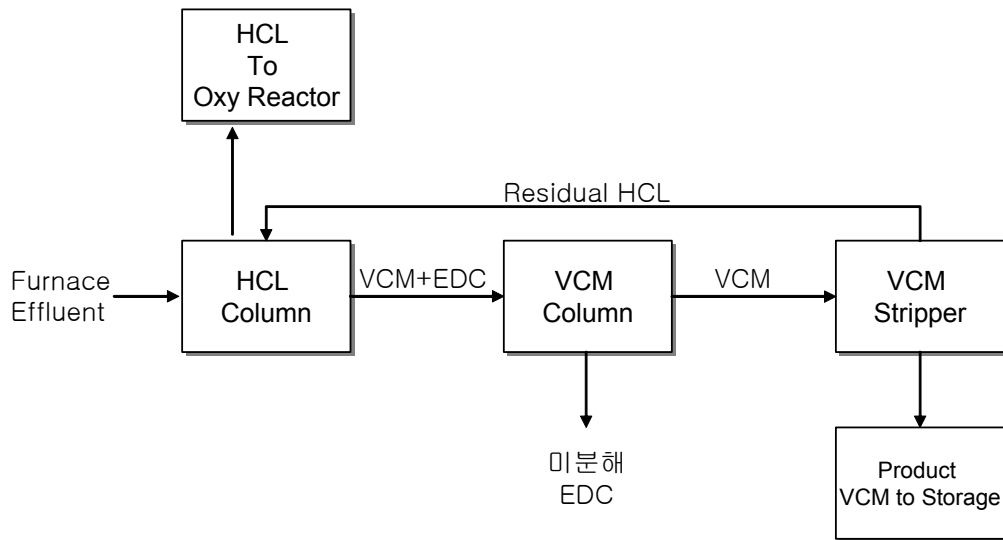
4) VCM 정제공정

조사 대상업체1의 EDC 반응공정은 HCL Column, VCM Column, VCM Stripper 의 4개 설비로 구성되어 있다.

- HCL Column : 탑상부로 HCL을 분리하는 공정, HCL은 Oxy Reactor에서 EDC 합성의 원재료로 사용됨

- VCM Column : VCM과 미반응 EDC를 분리하는 공정

- VCM Stripper : Product VCM중의 Trace HCL을 제거하는 공정



[그림 IV-15] VCM 정제공정

다. 공정배출량 발생 위치 확인

조사대상 업체의 총 17개 공정에 대한 온실가스 공정배출량 발생확인 결과 EDC 반응공정의 Oxy Reactor에서 화학반응에 의한 공정 이산화탄소가 배출되고 있었다. 공정배출량 확인은 설계자료와 현장 계측기를 통하여 확인하였다. 당 공장에는 EDC/VCM 생산라인이 총 2라인 설치되어 있으며, 각 라인별로 CO₂ 실시간 분석기가 1대씩 설치되어 있다.

설계자료를 기준으로 한 EDC 정제공정의 투입·산출물 목록은 <표 IV-12>와 같다. Oxy Reactor로는 에틸렌(C₂H₄), 염산(HCL), 산소(O₂)가 주원료로 유입된다. 1공장의 경우 대기 중의 공기를 압축하여 산소를 공급하므로 다량의 질소(N₂)가 같이 공급된다. Oxy Reactor에서의 발열반응을 통해 주 생산물인 EDC가 제조되고, 이 반응 과정에서 원료 중 탄소성분과 투입 공기 중 산소가 결합하여 이산화탄소가 생성된다. 이때 CO₂ 전구(前驅)물질인 일산화탄소도 이산화탄소의 약 4배(질량 기준) 가량 발생한다.

<표 IV-12> EDC 반응공정의 투입·산출물 종류

		EDC 반응공정					
		Air Compressor		Oxy Reactor		Hot Quench Col.	
		투입물	산출물	투입물	산출물	투입물	산출물
성 분	H ₂			✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)
	N ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	O ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CO				✓	✓	✓
	CO ₂				✓	✓	✓
	C ₂ H ₄			✓	✓	✓	✓
	C ₂ H ₂			✓(미량)			
	C ₂ H ₆			✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)
	HCL			✓	✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)
	VCM				✓(미량)	✓(미량)	✓(미량)
	EDC				✓	✓	✓
	H ₂ O	✓	✓	✓	✓	✓	✓

조사 대상 공장 중 1개 공장에서는 CO₂ 제거설비인 OC Scrubber가 가동되고 있다. 이 설비에서는 공정 이산화탄소가 공정 내부를 순환하면서 농도가 높아지는 것을 방지하기 위해 공정 가스 중 대부분의 이산화탄소를 알카리 용액에 흡수시켜 일정 비율을 연속적으로 제거한다. 이산화탄소 농도를 일정수준 이하로 유지하는 것이 목적이므로 공정 이산화탄소를 전량 제거하지는 않는다.

라. 공정배출 분석방법론 적용

공정배출이 확인된 VCM 제조공정의 EDC 반응설비에 대해 본 연구에서 개발된 7가지 공정 온실가스 배출량 분석방법을 적용해 보았다. 동일 VCM 공정이라도 사업장의 현황에 따라 적용할 수 있는 방법의 종류가 다를 것이다. 여기에서 제시되는 방법론별 적용가능성 평가는 조사 대상 사업장에만 해당되며, 국내 모든 VCM 공정의 적용가능성으로 대표성을 띄는 것은 아니다.

2개 공장 중 1공장의 2개 라인에서는 EDC Absorber Top에서 소각로로 가는 폐가스 Line상에서 공정가스를 실시간으로 측정하고 있다. 각 라인별로 Analyzer House가 현장에 설치되어 있다. 그러므로 계측기의 신뢰도만 확보된다면 이 측정값을 이용하여 공정 온실가스 배출량을 확보할 수 있다.

그러나, 조사대상 업체의 경우, 현장에 설치되어 있는 실시간 Analyzer는 정확한 수치의 수집보다는 운전상태를 확인하기 위해 설치되어 있으며, 실제 실험실에서 가스를 샘플링 하여 측정해본 결과 데이터 신뢰도가 낮은 수준으로 관리되고 있다. 실시간 수치는 주로 1.1~1.3 vol% 인데 실험실 측정치는 0.7~1.0 vol% 정도로 50% 가량의 오차를 보이고 있었다. 1년으로 환산한다면 그 절대량에 큰 차이가 발생하기 때문에 이 공정의 경우에는 실시간 계측기에 의해 측정된 공정배출량을 그대로 신뢰하기에는 어려움이 있다. 공정 이산화탄소가 규제물질이 아니므로 특별히 어떠한 신뢰도 수준 이하로 관리하거나 정확한 배출량을 수집해야할 의무가 없기 때문에, 이처럼 공정의 정상운전여부만 점검 하는 경우 등 계측기 정확도가 의심되는 경우에는 이들 계기로부터 수집한 데이터를 공정배출량의 기준자료로써 활용하기는 어려워 연속측정방법은 적용할 수 없었다. 다만, 실험실에서 간헐적으로 샘플링하여 분석한 데이터를 이용하여 연간 공정배출량을 환산할 수는 있었으며, 따라서 주기측정법은 적용가능하다.

EDC 반응공정의 Oxy Reactor에서 배출되는 온실가스량은 정확한 화학 반응식에 따라 결정되는 것이 아니라 내부의 온도, 압력 조건과 투입물질량에 따라 변경되므로 화학양론법은 적용하기 어렵다. 석유화학 공정은 투입물 및 산출물의 성분 자료의 신뢰도가 높으므로 탄소수지법은 적용가능하다. 신뢰도 높은 설계자료의 확보가 가능하여 설계배출계수법이 적용 가능하였다. VCM 제조 공정에 적용할 수 있는 공인배출계수는 아직 IPCC에서 제공되고 있지 않다.

<표 IV-13> 조사대상 EDC 반응공정의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성

측정방법	적용가능성	근 거
연속측정	불가	온실가스 측정기기 있으나 신뢰도 낮음
주기측정	가능	측정위치 확보 가능, 측정 시스템 신뢰도 높음
화학양론	불가	반응식에 의한 배출량 입증 어려움
측정배출계수	가능	측정위치 확보 가능, 측정 시스템 신뢰도 높음
탄소수지	가능	적용가능하나 분석대상에서 제외
설계배출계수	가능	신뢰성 있는 설계자료(PFD) 보유
공인배출계수	불가	적용 가능 배출계수 없음

조사 대상 공장 중 1라인은 Oxy Reactor에서 대기 중의 Air를 그대로 압축해서 이용하고 있는 반면, 2라인은 순도 높은 산소를 이용하고 있기 때문에 동일 제품 생산량 당 공정온실가스 배출량이 다르게 나타난다. 즉, 동일 제품을 생산함에도 불구하고 공정 특성에 따라 온실가스 배출계수가 달라진다.

6. SM 공정

가. 제품개요

SM(Styrene Monomer, 스티렌 모너머)는 방향족(芳香族) 물질로 표준상태에서 무색의 가연성 액체이다. 알코올 및 에테르에 녹으며 물에는 잘 녹지 않는다. 가열, 빛 또는 과산화물(중합촉매)에 의하여 쉽게 중화하며, 점도가 높아져 무색이 고체상태까지 된다. 폴리스티렌수지, 합성고무, ABS수지, 이온교환수지, 합성수지도료로 사용된다. 주원료로는 벤젠이 사용되고, 2004년 기준으로 LG화학, SKC, 동부한농화학, 삼성토탈, 여천NCC, 한국바스프, 현대석유화학에서 생산하고 있다. 국내에 연간 총 2,602,000ton을 생산할 수 있는 시설이 가동되고 있다.

<표 IV-14> 사업장별 SM 생산능력

회 사 명	공장위치	가동연도	시설능력 (10 ³ ton/yr)
LG화학	여수	'90	500
SKC	울산	'90	370
동부한농화학	울산	'79	210
삼성토탈	대산	'91	670
여천NCC	여수	'86	142
한국바스프	울산	'01	320
현대석유화학	대산	'91	390

1차 제조 공정에서 산화철을 주체로한 촉매를 사용하여 에틸벤젠을 탈수소시킨다. 에틸벤젠을 산화하여 아세트페놀을 만들고 이어서 이것을 수소화하여 메틸페닐카르비놀을 만들며 다시 이것을 탈수시켜 스티렌 단량체를 얻는다. 나프타분해 에틸렌플랜트의 부생, 가솔린 속의 C8 유분을 커트하여 특수한 추출제를 이용하여 스티렌을 추출, 증류하여 제품을 생산한다.

나. 공정 개요

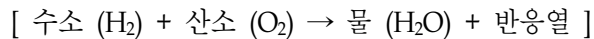
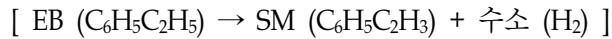
SM 제조공정은 EB(에틸벤젠) 반응공정, EB 증류공정, SM 반응공정, SM 증류공정

의 4개 공정으로 구성되어 있다.

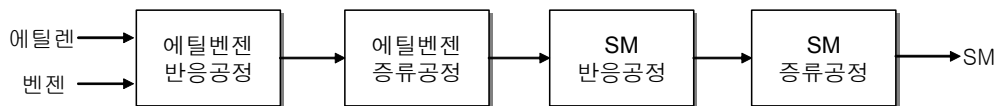
(i) EB 반응공정 : 에틸렌과 벤젠을 Zeolite촉매 존재하에 알킬화 반응시켜 에틸벤젠을 생성함. [ET (C₂H₄) + BZ (C₆H₆) → EB (C₆H₅C₂H₅)]

(ii) EB 증류공정 : 에틸벤젠 반응 혼합물 중 비점 차를 이용하여 에틸벤젠을 분리 정제함.

(iii) SM 반응공정 : 에틸벤젠을 산화철 촉매 존재하에 고온의 스팀과 혼합하여 탈수소 반응 시킴으로써 스티렌 모노머를 생성함. 이때 발생하는 수소를 산화 촉매 하에 산소와 반응시켜 생성된 반응열을 탈수소 반응의 열원으로 사용함.



(iv) SM 증류공정 : SM 반응 혼합물 중 비점차를 이용하여 고순도 SM을 분리 정제함.

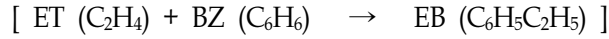


[그림 IV-16] SM 제조 공정 개략도

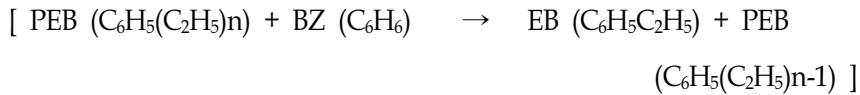
1) 에틸벤젠 반응공정

가) Alkylation & Transalkylation

i) 에틸렌과 과량의 벤젠을 Zeolite 촉매(EBZ-500S)가 충전된 Alkylator에서 고온 및 고압하에 알킬화 반응시켜 에틸벤젠을 함유하는 혼합물을 생성.

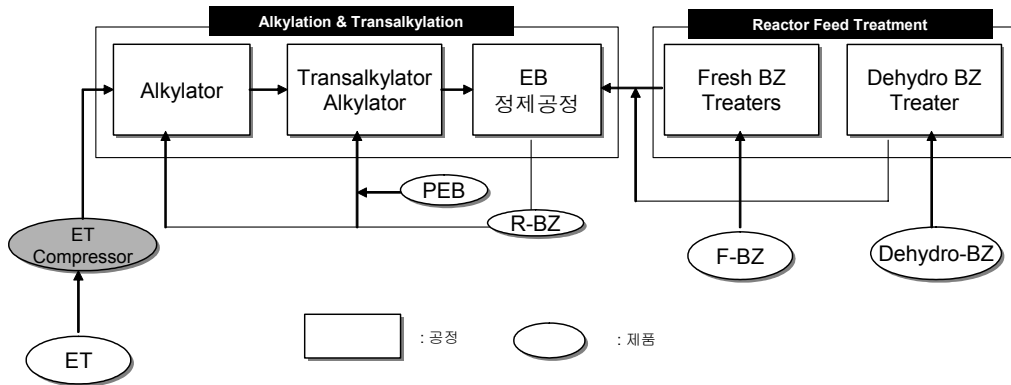


ii) EB 증류공정에서 회수된 PEB와 벤젠을 Zeolite 촉매가 충전된 Transalkylator에서 고온 및 고압하에 트랜스알킬화 반응시켜 에틸벤젠을 함유하는 혼합물을 생성



나) Reactor Feed Treatment

EB 반응공정 Zeolite 촉매의 촉매독으로 작용하는 벤젠 중의 질소화합물을 제거하는 공정



[그림 IV-17] 에틸벤젠 반응공정 세부 공정도

2) 에틸벤젠 증류공정

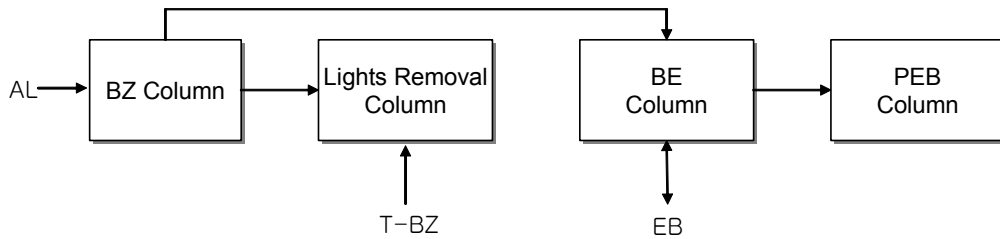
(i) BZ 증류탑 : Valve Tray 증류탑으로써 EB 반응공정의 AL에서 미반응 BZ를 분리하여 회수.

(ii) Lights Removal Column : Valve Tray 증류탑으로써 Treated BZ 중의 비방향

족 물질 및 수분을 제거.

(iii) EB 증류탑 : Structured Packing 탑으로써 BZ 탑저물질 중의 EB를 추출.

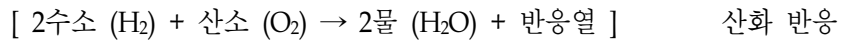
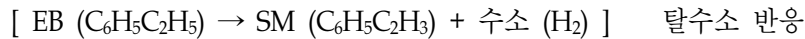
(iv) PEB 증류탑 : Structured Packing 탑으로써 EB 증류탑 탑저물질에서 PEB를 분리하여 회수하고 고비점물질(Flux Oil)은 연료로 사용.



[그림 IV-18] 에틸벤젠 증류공정 세부 공정도

3) SM 반응공정

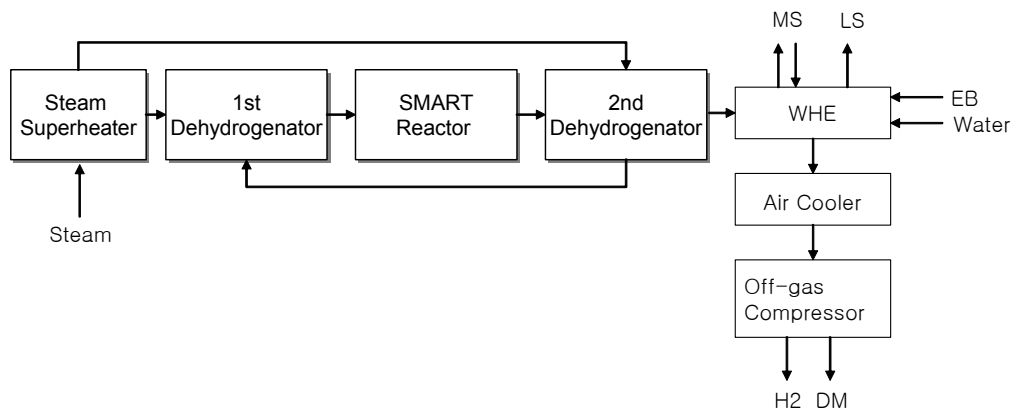
(i) 탈수소 반응공정 : EB를 산화철 촉매 존재하에 고온의 스팀과 혼합하여 탈수소 반응 시킴으로써 스티렌 모노머를 생성하고 이때, 발생하는 수소를 산화촉매하에 산소와 반응시켜 생성된 반응열을 탈수소 반응의 열원으로 사용.



(ii) 폐열 회수 및 Off-Gas 회수 공정

- 고온의 반응가스는 반응기에 공급되는 스팀/EB 예열 및 스팀을 발생시킨 후 최종적으로 공기 냉각기에서 냉각되어 물과 DM(Dehydrogenated Mixture)으로 분리.
- 탈수소 반응의 부산물인 수소가스는 압축기에 공급, 압축되어 스팀을 과열시

키는 Steam Superheater의 연료로 사용.



[그림 IV-19] SM 반응공정 세부 공정도

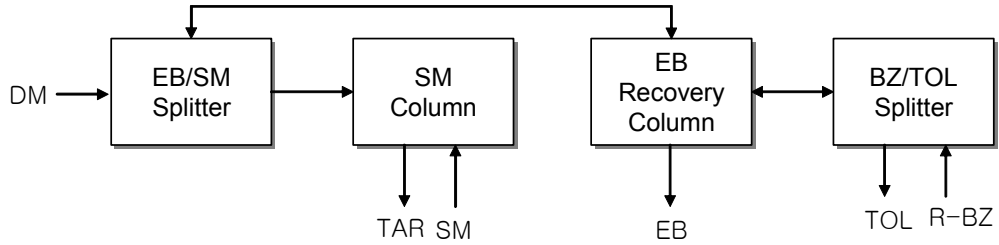
2-4) SM 증류공정

(i) EB/SM 분리탑 : DM중 EB와 SM을 진공 조건하에서 분리. 탑저부의 SM중 EB 함량을 낮게 유지하는 Structured Packing 탑

(ii) SM 정제탑 : 탑정에서 대부분의 SM을 정제하고 탑저부의 고비점물질(Tar)는 연료로 사용하는 Structured Packing 탑

(iii) EB 회수탑 : EB/SM 분리탑 탑정물질 중의 EB를 분리하여 회수하는 Structured Packing 탑

(iv) BZ/TOL 분리탑 : EB 회수탑 탑정물질을 BZ과 TOL으로 분리하여 회수하는 증진탑



[그림 IV-20] SM 증류공정 세부 공정도

다. 공정배출량 발생 위치 확인

조사대상 업체의 SM 공정에 대한 온실가스 공정배출량 발생여부 확인 결과 SM 반응공정의 Smart Reactor에서 투입된 O₂와 SM, EB중의 C가 반응하여 공정 이산화탄소가 발생되고 있었다. Smart Reactor에서는 메탄도 일부 발생하나 후공정에서 전량 소각처리 되므로 공정배출량으로 보기는 어렵다. CO₂ 배출량을 측정할 수 있는 별도의 계측기는 설치되어 있지 않았고, 현장 전문가의 조언 및 설계자료를 통하여 공정 이산화탄소 배출을 확인하였다.

<표 IV-15> Smart Reactor의 투입·산출물 종류

		분해로	
		투입물	산출물
성분	Air		
	H ₂		✓
	CO ₂		✓
	Benzene	✓	✓
	Tollene	✓	✓
	Ethylbenzexe	✓	✓
	Stylene	✓	✓

라. 공정배출 분석방법론 적용

공정배출이 확인된 SM공정의 Smart Reactor에 대해 본 연구에서 개발된 7가지 공정 온실가스 배출량 분석방법을 적용해 보았다. 동일 SM 공정이라도 사업장의 현황에 따라 적용할 수 있는 방법의 종류가 다를 것이다. 여기에서 제시되는 방법론별 적용가능성 평가는 조사 대상 사업장에만 해당되며, 국내 모든 SM 공정의 적용가능성으로 대표성을 띄는 것은 아니다.

조사대상 사업장의 SM공정에는 온실가스 측정기기가 설치되어 있지 않아 연속측정방법은 적용할 수 없다. 가스 샘플 측정에 의한 주기측정법 및 측정배출계법은 샘플측정 위치 확보 문제로 적용이 어렵다. Smart Reactor 내부에서 발생하는 이산화탄소는 투입물질의 정확한 반응 상관관계를 규명하기 어려워 화학양론법도 적용하기 곤란하다. SM공정은 투입물 및 산출물의 성분 자료의 신뢰도가 높으므로 탄소수지법은 적용가능하다. 신뢰도 높은 설계자료의 확보가 가능하여 설계배출계수법이 적용가능하다.

<표 IV-16> 조사대상 Smart Reactor의 공정온실가스 배출량 계산방법 적용가능성

측정방법	적용가능성	근 거
연속측정	불가	온실가스 측정기기 없음
주기측정	불가	측정위치 확보 어려움
화학양론	불가	반응식에 의한 배출량 입증 어려움
측정배출계수	불가	측정위치 확보 어려움
탄소수지	가능	적용가능하나 분석대상에서 제외
설계배출계수	가능	신뢰성 있는 설계자료(PFD) 보유
공인배출계수	불가	공인배출계수 없음

V. 결론 및 향후 과제

우리나라의 온실가스 배출량을 1995년 이후 2003년간 기간에 대해 추세분석을 해 보면, 산업공정 배출원 가운데 합성가스 소비의 추세기여도가 매우 높게 나타난다. 이는 1995년 이후 합성가스 소비량 변화가 크게 일어나면서 그로 인한 온실가스 배출량 변화 폭이 컸던 것에 기인하는 것이다. 이는 현재의 배출량 변화 추세 상에서 합성가스 소비가 중요한 비중을 점하는 것은 물론 향후 우리나라 온실가스 배출전망에 있어서도 합성가스 중요성이 강조될 수 있음을 예시하는 것으로도 받아들일 수 있을 것이다. 만약 HFCs를 중심으로 몬트리올 의정서의 규제를 받는 CFCs 대체가 급격히 일어난다면 그로인한 배출량 증가는 클 것이기 때문이다.

이러한 잠재력이 있음에도 불구하고 우리나라의 합성가스 관련 소비 내지 공급자료는 매우일천한 수준에 있다. 특히 다양한 용도로 사용되고 있는 HFCs 소비자료는 더더욱 그러하다. 그러므로 본 연구에서는 합성가스 소비과정에서 배출되는 온실가스 배출량을 보다 안정적이고 정확하게 산정하기 위해서 어떤 방식으로 어느 자료를 가스별로 수집해야하는 것인가에 대한 답을 제시하려하였다.

HFCs를 용도별로 구분해서 각 용도별로 자료여건을 감안한 자료수집 대안을 제시하고 있으나 대안마련이 마땅치 않을 경우에는 차선택으로 대체안에 대해서도 언급하고 있다. 이러한 자료수집 대안은 현재의 여건에서 당장 적용하기 어려운 것도 있다. 그럼에도 대안으로 제시하고 있는 것은 그러한 대안을 염두에 두고 자료수집 여건을 차근차근히 만들어나가야 한다는 당위론적 필요성 때문이다.

간략하게 합성가스별 자료 수집 대안을 정리해보면, HFCs는 HFCs 가스 수입 공

급선을 통해 용도별 공급량 자료를 구하는 것이 최선으로 판단되며, 의료용 용도인 MDI용 HFC는 제약사에 소비자료 추정을 위한 기초자료 제공을 요청하는 것이 모범 대안일 것이다. PFCs는 반도체용으로만 소비되는 특성이 있으므로 한국반도체산업협회와 한국디스플레이연구조합을 통해 동 용도로 소비된 PFCs 자료를 구하는 것이 모범대안이다. 마지막으로 증전기기용 SF₆ 가스 소비량 자료는 한국전기산업진흥회를 통한 자료수집 네트워크를 자료수집 주체와 한국전기산업진흥회가 공동으로 구축하여 관리하는 것이 모범 대안 일 것이다.

아울러 본 연구에서는 석유화학업종의 공정 온실가스 배출량을 계산할 수 있는 7개 방법론을 개발하고, 공정의 자료 확보가능성 및 관련 정보의 신뢰도에 따라 최적의 방법론을 선택할 수 있는 의사결정도를 제시하였다.

공정 온실가스 배출량 계산방법은 계산결과의 신뢰도 순으로 연속측정, 주기측정, 물질수지, 측정배출계수, 탄소수지, 설계배출계수, 공인배출계수가 제안되었다. 물론, 이들 방법론의 신뢰도는 기초자료의 확보가능성과 자료의 정확성에 따라 달라진다. 석유화학 공정의 현장조사과정에서 방법론들을 적용해 본 결과 주기측정, 측정배출계수, 탄소수지, 설계배출계수, 공인배출계수 방법이 적용 가능하였다. 연속측정방법은 계측기의 신뢰도 문제로 조사 대상 공정에는 적용하기 어려웠다. 일부 공정에서는 측정위치 확보의 어려움으로 주기측정, 측정배출계수방법은 적용이 용이하지 않았다. 탄소수지 및 설계배출계수는 대부분의 공정에 적용 가능하였다.

개발된 공정 온실가스 배출량 계산방법과 의사결정도는 국내 석유화학 산업의 대표적인 10개 제품을 생산하는 공정에 적용해 보았다. 석유화학 공정 온실가스 배출원 조사는 국내 석유화학 부문의 대표제품으로써 기초유분인 에틸렌, 프로필렌, Mixed-C4, 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 부타디엔과 대표적인 모너머 제품인 EDC, VCM, SM의 10개 제품이다. 현장 조사 결과, 이들 10개 제품은 설비기준으로 볼 때 NCC공정, BTX공정, BD공정, VCM공정, SM공정의 총 5개 공정에서 생산되고 있었다. 공정

배출의 확인 및 배출량 분석방법론의 적용은 제품 단위가 아닌 이들 5개 공정단위로 실시하였다.

조사 대상 10개 석유화학 제품 및 공정에 대해서는 각 제품 및 제조공정의 특징을 조사하여 기술하였다. 조사 과정에서 각 공정의 전문가 회의를 개최하고, PIS 계통확인, 설계자료 확인 작업을 통해 공정 온실가스가 발생여부를 조사하였다. 조사 결과 NCC공정의 납사분해로, VCM공정의 EDC 반응로, SM공정의 Smart Reactor에서 공정 이산화탄소가 배출되는 것을 확인하였다. VCM공정의 EDC반응로에는 온실가스 배출량을 산정할 수 있는 계측기가 설치되어 있었다. 그러나, 이 계측기로부터 수집되는 온실가스 정보는 공정의 정상운전상태를 모니터링 하기 위한 용도로 이용되고 있으며, 실제 샘플을 채취하여 분석해 본 결과값과, 설계자료와는 많은 차이를 보이고 있었다. 따라서, 연속측정 설비가 설치되어 있음에도 본 연구에서 가장 신뢰도 높은 계산 방법론으로 제안한 연속측정방법을 적용하여 배출량을 계산할 수 없었다. NCC공정과 SM공정에는 설계배출계수를 적용할 수 있었다.

NCC공정 및 VCM공정에서는 공정 온실가스인 이산화탄소를 제거하는 설비가 확인되었다. NCC공정에서는 분해로에서 발생된 공정 이산화탄소가 후 공정의 반응로에서 촉매작용을 방해하므로 전량 제거할 수 있도록 2단계의 제거시스템이 가동되고 있었다. 제거율은 100%이다. VCM 공정에서는 공정 이산화탄소가 공정 내부를 순환하면서 농도가 높아지는 것을 방지하기 위해 이산화탄소량의 일정 비율을 연속적으로 제거하는 공정이 설치되어 있었다. 이산화탄소 농도를 일정수준 이하로 유지하는 것이 목적이므로 NCC 공정처럼 전량 온실가스가 제거되지는 않는다. 기업에서 공정 고유의 온실가스 배출계수를 작성하고자 할 때에는 이러한 제거공정의 효율도 반영하여야 한다.

현장 적용 결과 설계배출계수와 탄소수지 방법은 대부분의 석유화학 공정에 비효율적으로 적용 가능함을 확인 하였다. 연속측정, 주기측정, 측정배출계수 등 온실

가스 배출량 측정이 필요한 방법은 계측기 설치, 운용에 소요되는 비용이 크며, 조그마한 관리소홀에 의해서도 배출량의 신뢰도가 급격히 낮아질 우려가 있으므로, 가능하다면 비용효율적인 다른 방법으로 접근할 것을 권고한다. 향후 국내 배출권 거래 등 온실가스 감축을 위한 다양한 정책수단들이 도입되고, 기업의 온실가스 배출량 보고가 의무화 되더라도 배출량 계산에 소요되는 비용을 최소화하면서 신뢰도 높은 배출량을 계산할 수 있는 방법을 선택하는 것이 바람직하다. 일례로, 석유화학 공정은 설계자료의 신뢰도가 높으므로 설계배출계수법도 적은 비용으로 높은 신뢰도를 갖는 배출량 계산 결과를 얻을 수 있다. 오히려 관리 시스템이 잘 유지되지 않는 측정 기반의 배출량 산정방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 제안된 총 7가지의 공정배출량 산정방법론은 국외의 온실가스 배출량 계산 프로토콜들과 실제 국내 석유화학공정의 공정배출량을 산출하는 과정에서 축적된 정보과 지식을 바탕으로 수립되었다. 따라서, 방법론들의 국제적 신뢰성 확보는 물론 실제 현장의 공정배출량 분석 시에도 손색없이 적용될 수 있을 것을 예상된다.

산업부에서 국가 및 기업 온실가스 배출량 계산의 정확도를 제고하기 위해서는 공정부문의 국내 고유의 온실가스 배출계수 확보가 필요하다. 본 연구에서 제시한 공정 온실가스 배출량 분석방법론은 이러한 국가 배출계수의 수립이나 업종/기업/공정 고유의 공정 온실가스 배출계수 도출에 많은 도움이 될 것으로 기대된다. 향후 국가나 산업업종의 대표성을 가진 기관에서 이러한 온실가스 배출계수를 조사, 제시한다면 보다 용이하고 정확한 국가/기업 온실가스 배출통계 구축이 가능할 것이다.

모쪼록 본 과제를 통해 제시된 합성가스 소비량 관련 기반 제시대안과 석유화학 업종 관련 방법론이 보다 발전적인 방향에서 차후에도 지속적으로 연구·검토되기를 바라며 본 과제가 그 기반이 된다면 매우 흡족할 것이라 생각한다.

참고문헌

1. IPCC, 1996, *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 3.*
2. IPCC, 2000, *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.*
3. IPIECA/IAOGP/API, 2003, *Petroleum Industry Guidelines for Reporting Greenhouse Gas Emissions.*
4. WRI/WBCSD, *The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard Revised Edition.*
5. California Climate Action Registry, *California Climate Action Registry General Reporting Protocol.*
6. Canada's Climate Change Voluntary Challenge & Registry. *Challenge Registry Guide to Entity & Facility-Based Reporting.*
7. Department for Environment, Food and Rural Affairs. *Guidelines for the Measurement and Reporting of Emissions by Direct Participants in the UK Emissions Trading Scheme.*
8. Energy Information Administration. *Voluntary Reporting of Greenhouse Gases.*
9. 관세청, 수입통계연보, 각 호
10. 한국정밀화학진흥회 내부자료
11. 허완수, 반도체 환경기술의 국내외 최근동향
12. 현대환경연구소, 환경 VIP Report 제46호
13. Atofina Chemicals Inc. 가스특성 자료



이 보고서는 에너지관리공단에서 시행한 기후 변화협약 대응체계 구축사업의 최종보고서입니다.