

# 유해화학물질관리를 위한 그린화학(GC)제도 연구(1)



박정규

- 한국환경정책·평가연구원 연구위원
- 美 오리건주립대 이학박사
- 서울대 농학학사

차례

제1장 서론

1. 연구의 목적
2. 연구내용 및 방법

제2장 그린화학에 대한 고찰

1. 시행배경
2. 그린화학의 목적과 주요원리
3. 그린화학의 기법

제3장 그린화학의 국제적 시행현황

1. 연구 및 개발프로그램
2. 교육 및 홍보프로그램
3. 정보수집 및 공유프로그램
4. 정부의 활성화방안
5. 관련학술단체

제4장 그린화학의 시행효과 및 향후 전망

1. 그린화학의 시행효과
2. 그린화학의 향후 전망

제5장 그린화학 관련 국내제도 및 연구동향 분석

1. 그린화학 관련제도 및 프로그램
  - 가. 유해화학물질 배출량조사제도
  - 나. 청정생산기술
  - 다. 환경표지제도
  - 라. Responsible Care
2. 그린화학 관련연구
3. 그린화학과의 비교

제6장 화학물질관리와 그린화학과의 연계방향

1. 우리나라 화학물질의 관리현황
2. 화학물질 관리상의 문제점과 향후 전망
  - 가. 화학물질 관리상의 문제점 - 그린화학과의 연계하여
  - 나. 화학물질 관리의 향후 전망
3. 그린화학의 국내 도입의 필요성
4. 화학물질 관리와 그린화학과의 연계방향
  - 가. 그린화학 시행을 위한 역할분담
  - 나. 세부 연계방향

제7장 결론

# 제1장 서론

## 1. 연구의 목적

1990년대 들어 선진국의 환경정책이 위해성에 기초한 통합 환경관리(Risk-based Integrated Environmental Management) 체계로 전환되었고, 리우선언에서도 지속가능한 사회를 건설하기 위해 화학물질의 위해성 관리를 강조한 바 있다.

위해성 관리란 우리가 일상생활에서 사용하고 있는 화학물질 중 위해가 있다고 확인되거나 의심되는 물질의 사용을 제한하여 화학물질로 인한 피해를 최소화하는 것이다. 그러나 이와 같이 화학물질 생산 이후의 관리에 치중하던 종전의 관리체계에서 화학물질 합성단계 또는 화학제품 생산단계부터 위해성이 적은 물질을 생산하도록 하는 화학물질 관리의 사전오염예방정책이 새롭게 시도되었다.

이것이 1990년 미국 EPA에서 처음 도입하여 시행하고 있는 그린화학 정책으로 화학물질 위해성 관리정책으로의 그 실효성을 인정받아 1990년대 중반부터는 일본, 영국, 독일 등 선진국들이 이 정책을 도입하였으며, 최근에는 OECD 등 화학물질 관련 국제기구에서 그린화학의 제도화를 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

그린화학은 또한 물질관리에서 제품관리체계로 전환되고 있는 국제적인 화학물질 관리정책 변화 기조에서 제품관리를 위한 기반확립을 위해 반드시 요구되는 정책이다.

그러나 아직 우리나라에서는 환경정책 전반에 대한 사전오염예방 원칙이 강조되고는 있으나, 화학물질 관리에서 사전오염예방을 위한 구체적인 정책이 시행되고 있지는 못한 실정이다. 또한 대부분의 국가들이 리우선언과 WSSD 회의에서 제의된 화학물질 분야의 지속가능발전전략에 따라 안전한 화학제품 생산을 21세기 화학물질 관리정책의 주요 목표로 선정할 가능성이 매우 크기 때문에 우리도 이에 대한 대응책 마련이 요구된다.

한편 우리나라 화학물질 관리의 가장 큰 문제점 중 하나는 유해화학물질 관리로 지정된 이후의 관리정책, 즉 유해화학물질 사용을 제한 또는 금지하고 이들의 대체물질 사용을 의무화하는 등의 정책이 선진국에 비해 매우 미흡한 실정이며, 이는 대체물질 개발에 대한 정부의 지원과 산업체의 관심이 부족한 때문이다.

따라서 향후 국제적인 화학물질 관리기조에 동참하고 국내 화학물질 관리의 기반을 다지기 위해서는 안전한 화학제품 생

산을 정책적으로 유도하고 장려할 수 있는 제도가 요구되며, 이는 선진국과 같이 그린화학 정책을 통해 해결가능하다.

이에 본 연구에서는 화학물질 관리의 사전오염예방정책으로 국제적으로 시행되고 있는 그린화학에 대해 도입배경과 주요 원리, 각국의 시행현황, 시행효과 등을 살펴보고, 화학물질의 위해성 관리체계 확립을 위해 국내도입이 필요한지를 살펴 보았다.

또한 외국의 시행사례와 우리나라 화학물질 관리현황에 비추어 국내 관리체계내에서 그린화학을 시행하게 될 경우 고려해야 할 사항으로 화학물질 관리주체의 역할분담 및 분야별 연계방향을 도출하였다.

본 연구는 OECD 등 국제적으로 적극 권고하고 있는 그린화학에 대한 연구를 통해 화학물질의 위해성으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하고 우리나라 화학물질 관리정책의 선진화를 꾀하고자 수행되었다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구의 주요내용은 국내외 그린화학에 대한 주요 동향을 분석하고 이를 토대로 국내 도입방안을 도출하고자 다음과 같이 구성되어 있다.

첫째, 그린화학에 대한 고찰로, 그린화학의 시행배경과 시행 목적을 파악하고 그린화학의 주요 원리와 기법을 살펴보았다.

둘째, 그린화학의 국제적 시행현황을 살펴보고자 연구 및 개발프로그램, 교육 및 홍보프로그램, 정부의 활성화방안, 정보수집 및 공유프로그램 등 네 분야로 나누어 미국, 일본, 영국 등 선진국과 OECD, EU 등 국제기구의 시행현황을 비교·분석하였다. 또한 국제적으로 그린화학 활동을 활발하게 하고 있는 관련학술단체와 그린화학네트워크 등을 조사하여 그린화학에 대한 그들의 역할과 주요 활동사항을 조사하였다.

셋째, 그린화학이 도입된 지난 10년 동안의 시행효과를 미국과 오스트리아를 중심으로 살펴보고, 향후 그린화학 기술이 나아갈 방향에 대해 전망해 보았다.

넷째, 아직 국내에서는 그린화학이 도입되지는 않았으나 그린화학과 관련된 청정생산기술, Responsible Care 등의 제도가 시행되고 있어 이들 관련제도를 그린화학과의 비교·분석하였

고, 국내에서 시행되고 있는 그린화학 관련 연구동향을 살펴보고 있다.

다섯째, 국내 화학물질 관리와 그린화학과의 연계방향을 모색하고자 우리나라 화학물질의 관리현황과 화학물질 관리상의 문제점을 그린화학과의 연계하여 도출하였으며, 이에 따른 그린화학의 국내 필요성을 확인하였다.

또한 그린화학과의 국내 화학물질 관리와의 연계방향을 도출하고자 화학물질 관련 주체들, 즉 정부, 산업체, 시민 등의 역할 분담과 분야별 추진방향을 제안하였다.

그 외 1998년 OECD가 회원국을 대상으로 각국의 그린화학 시행현황 및 관련제도를 조사하기 위해 실시한 설문조사 결과를 부록에 수록하여, 우리나라를 위시한 다른 국가들의 그린화학 시행현황을 비교할 수 있도록 하였다.

관련자료는 주로 문헌조사, 관련저널 및 인터넷을 통해 수집하였으며, 관련문헌은 미국 등 선진국에서 대학교 교재로 개발된 그린화학 책을 참조하였다.

또한 「그린화학지」 등의 그린화학 전문학술지를 통해 그린화학의 기술동향 및 전망을 도출하였으며, 각국의 그린화학네트워크에 접속하여 현황자료를 수집하였다.

특히 일본의 통산성과 일본화학혁신연구소(JCII)를 방문하여 그린화학에 대한 일본 정부의 활성화방안 및 관련 기업의 자발적 노력 등을 살펴보았으며 관련자료를 수집하였다.

우리나라와 화학물질 관리체계가 유사한 일본의 그린화학 시행현황은 향후 국내에 그린화학을 도입하기 위한 좋은 사례이며, 이는 본 보고서 제 6장 화학물질 관리와 그린화학과의 연계방향을 도출하는데 참조자료로 활용되었다.

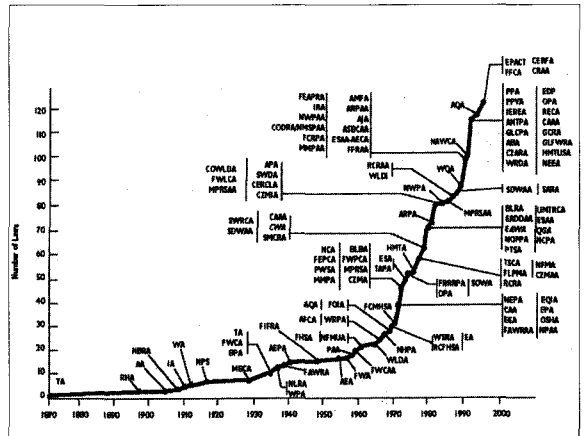
그 외 국내 화학물질 관련전문가 및 시민단체와의 토의를 통해 화학물질 관리의 문제점과 그린화학 도입의 필요성, 도입시 고려하여야 할 사항을 도출하였다.

을 개발함으로써 전세계 식량공급이 폭발적으로 증가하였고, 운송, 통신, 의복, 주거 등에서도 삶의 질을 향상시켰다.

이처럼 많은 화학물질의 유용성에도 불구하고, 1950년대 후반과 1960년대 초반 들어 인체의 건강이나 환경에 미치는 화학물질의 위해성 문제가 제기되기 시작하였다.

특히 1961년에 유럽에서 일어난 탈리도마이드 Thalidomide, 임신초기의 구토증상등을 완화시키는 약품 문제와 1962년에 출판된 레이첼 칼슨의 「침묵의 봄」 등의 영향으로 사람들은 화학물질의 사용으로 인해 예기치 못한 부작용이 일어날 수 있음을 깨닫게 되었다.

이후 1960-1980년대에는 화학물질로 인한 환경문제가 좀더 명료하게 나타나 이들 문제 해결을 위한 관련법률 및 규정이 마련되기 시작하였다(〈그림 2-1〉). 여기에 타임즈 비치 사건과 러브 커널사건으로 인해 화학물질을 위시한 환경오염에 대한 우려가 더욱 커져, 결국 전세계적으로 가장 먼저 미국의회가 특정 환경문제를 다루는 새로운 법안을 통과시켰다.



〈그림 2-1〉 미국의 환경법 증가추세

그 법안이 바로 Superfund로 이를 통해 오염지역의 정화가 이루어지고 있으며, 때로는 환경재앙을 통해 새로운 법률이 마련되기도 하는데 1970년대의 「맑은 물(Clean Water)」과 「깨끗한 공기(Clean Air)」 관련법규가 제정되었으며 1980년대의 CFCs 관련 규정, 인도의 보팔사건으로 인해 미국의 Emergency Planning and Community Right-to-Know Act 등이 제정되기도 하였다.

그러나 초기의 환경법률들은 환경으로의 화학물질 유출과 인체에 대한 노출에 대한 이해가 부족하여 일단 환경에 배출된

## 제2장 그린화학에 대한 고찰

### 1. 시행배경

지난 세기동안 화학분야는 항생물질과 같은 약품의 개발을 통해 의학적인 혁명을 이끌었다. 그 결과 1900년에는 47세이던 기대수명이 1990년대에는 75세로 늘어났다.

또한 화학을 통해 작물을 보호하고 성장을 촉진하는 물질들

화학물질을 대기, 수질 및 토양내에서 처리하는 것에 초점을 맞추었다.

그 후 화학물질의 독성 종말점(end-points)과 환경적 영향에 대한 개념이 알려지면서 환경법도 환경으로 배출되는 화학물질의 양을 엄격히 제한하는 방향으로 전환되었는데, 이때의 환경규정은 대부분 정부의 직접규제(Command and Control)에 의해 실행되었다.

1990년대 들어서는 단순히 환경배출을 억제시키고 환경질에서의 농도를 규제하는 사후처리 방식에서 사전에 오염원의 발생을 최소화시킬 수 있는 화학물질의 전생애 관리 또는 사전 오염예방으로 관리정책이 전환되었으며, 이와 같은 기조에 발맞추어 미국의 경우 1990년에 오염방지법 Pollution Prevention Act이 의회에서 통과되었다.

사전오염예방(Pollution Prevention, P2)을 실천하기 위한 새로운 정책들이 1990년대에 수립되었는데, 특히 화학물질 및 화학산업에 대한 정책이 많이 개발되었다. 미국의 TRI(Toxic Release Inventory, 유해화학물질배출량조사제도) 조사결과에 의하면 환경중으로 유해화학물질을 배출하는 대표적인 산업은 화학산업으로, 유해물질을 배출하는 상위 10위까지의 산업분야중 화학산업은 나머지 9개 분야의 배출량 총합보다 많은 양의 유해물질을 배출하는 것으로 확인되었다.

따라서 산업 전반에서의 사전오염예방도 매우 중요하지만, 화학산업에서 화학물질의 배출을 최대한 억제하는 예방정책이 환경오염을 저감하는데 매우 효과적임이 입증되었다.

화학산업에서의 사전오염예방은 배출원 관리, 공정관리, 재활용 증대, 가정내에서의 화학제품 안전관리, 그린화학 등을 통해 실현될 수 있다(<그림 2-2>).

그린화학 또는 지속가능한 화학이란 『효율적·효과적이며 안전하고 환경친화적인 화학제품 및 공정의 설계·제조·사용 OECD는 그린화학을 “The design, manufacture and use of efficient, effective, safe and more environmentally benign chemical products and processes”로 정의함』을 촉진하는 제도로서, 유해한(이때 “유해한 물질”은 hazard 또는 toxicity 개념에서 물질 자체의 독성이 있는 물질을 의미함. 이에 비해 “위해한 물질”은 risk 개념에서 유해한 물질이면서 인간이나 환경에 노출이 많이 되는 물질을 의미함) 물질(또는 독성물질)의 생산 또는 사용을 최대한 저감하기 위해 화학제품과 화학공정을 설계하는 것을 의미한다.

이는 다른 사전오염예방과는 달리 화학산업 및 화학제품에 국한하여 실시되는 제도이며, 유해한 물질(제품의 개념도 포



그린화학은 신규제품 뿐 아니라 기존의 제품이라도 그 위해성이 의심되는 제품을 좀 더 안전한 제품으로 바꾸어 화학물질로 인한 위해성을 최소화 또는 사전에 예방하고자 하는 노력이다.

그린화학은 지속가능한 사회(Sustainable Society) 구현을 위한 화학물질 분야의 추진 과제 중 하나로 안전한 화학제품의 생산 및 사용으로 인해 화학물질의 위해성으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하고 자원을 절약하기 위한 기반사업이다.

이런 이유로 OECD는 그린화학 대신 “지속가능한 화학”이라는 용어를 사용하고 있다.

함)의 배출을 저감하는 단계를 넘어 유해한 물질의 생산 자체를 최소화하는 상위개념의 사전오염예방정책이다.

따라서 주로 분자(Molecule) 수준에서의 환경친화적이며 안전한 제품의 합성 및 생산을 활성화시킨다.

물론 다른 사전오염예방정책에서도 안전한 제품의 생산을 장려하고는 있으나, 20세기 들어서부터 사용되어 온 오래된 제품이나 공정을 좀 더 안전하게 바꾸기보다는 새로운 제품의 안전성을 높이는데 많은 노력을 기울이고 있다.

이에 비해 그린화학은 신규제품 뿐 아니라 기존의 제품이라도 그 위해성이 의심되는 제품을 좀 더 안전한 제품으로 바꾸어 화학물질로 인한 위해성을 최소화 또는 사전에 예방하고자 하는 노력이다.(그린화학의 도입으로 인해 그동안 환경문제 해결에 소극적이었던 합성화학 전문가들의 역할이 매우 중요해짐. 화학분야중 전공분야에 따른 환경문제 관련여부를 살펴보면, 분석화학은 환경오염의 평가 및 확인 과정에, 물리화학은 환경시스템 모델개발에, 지구화학은 지구환경문제 해결에 관련되어 있음)

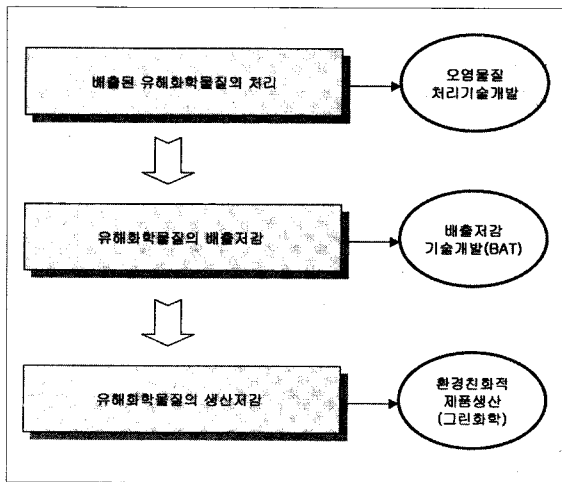
또한 그린화학은 지속가능한 사회(Sustainable Society) 구현을 위한 화학물질 분야의 추진 과제 중 하나로 안전한 화학제품의 생산 및 사용으로 인해 화학물질의 위해성으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하고 자원을 절약하기 위한 기반사업이다.

이런 이유로 OECD는 그린화학 대신 “지속가능한 화학”이라는 용어를 사용하고 있다.

이와 같은 그린화학은 1990년 미국 EPA에서 처음 도입되어, 현재 영국, 독일, 일본 등 대부분의 선진국에서 시행되고 있다.

OECD는 1998년 위험성 관리프로그램(Risk Management Program, RMP)내에 그린화학위원회를 설치하여 각 회원국내의 정부, 산업계 및 학계에서 수행중인 그린화학 관련현황을 조사한 바 있으며, 현재 10개 국가가 참여하여 그린화학 시행 지침을 작성 중에 있다.

그러나 우리나라에서는 아직 그린화학에 대한 개념조차 소개되지 않은 상황으로, 일부 유사한 개념의 제도(본 보고서 제 5장 참조)가 시행되고는 있으나 화학물질분야의 사전오염예방 및 지속가능한 발전 실현을 위한 제도로는 미흡한 실정이다.



<그림 2-2> 유해화학물질의 정책개념 변화

## 2. 그린화학의 목적과 주요원리

그린화학의 궁극적인 목적은 “제품의 기능은 그대로 유지하되 독성(또는 유해성) 없는, 폐기물발생이 없는, 에너지 효율적인 화학제품의 생산(The ultimate goal of hazard-free, waste-free, energy-efficient synthesis of non-toxic products without sacrificing efficacy of function)”이며, 본 보고서에서는 이와 같은 그린화학의 목적을 통틀어 포괄적인 개념인 “안전한 화학제품 생산”으로 서술하고자 한다.

한편 안전한 화학제품을 생산하기 위해서는 다음 <표 2-1>에서와 같은 원리를 적용해야만 한다.

우선 독성이 없거나 적은 화학제품을 생산하기 위해서는 이

와 같은 안전한 화학제품을 합성하는 기술의 개발이 요구된다.

환경적으로 안전한 화학물질은 첫째, 독성기작을 일으키는 특정 반응에 대한 화학물질의 구조변경, 둘째, 독성기작에 대한 정보가 부족할 때 화학물질의 구조와 독성간의 상관관계를 통해 독성영향을 저감·제거, 셋째, 화학물질의 생체이용가능성(bioavailability)을 최소화하는 방법 등을 통해 생산될 수 있다.

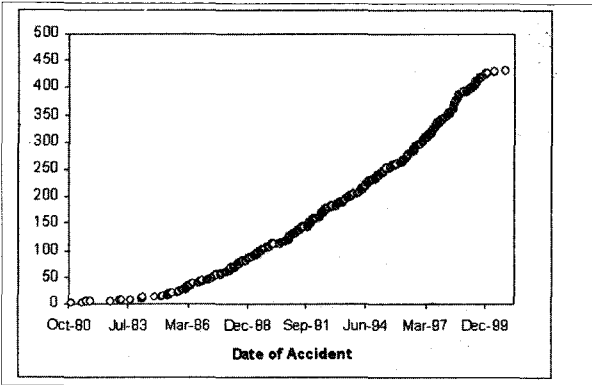
또한 제품이 폐기물 형태 또는 사고로 환경중으로 배출되었을 때 쉽게 분해될 수 있도록 합성되어야 할 것이다.

최근 들어 사람의 건강과 환경을 위협하는 유해화학물질의 일반적인 특성 중 하나가 환경에 오래 잔류하고 쉽게 분해가 안되며 먹이사슬을 통해 고농도로 생물 농축된다는 점이다(예, POPs Persistent Organic Pollutants, 내분비계 장애물질, PBTs Persistent, Bioaccumulative, Toxicants 등). 최근의 화학물질 및 제품의 개발과정에서는 이와 같은 화학물질의 특성이 최소화될 수 있도록 노력하는 것이 국제적인 추세이다.

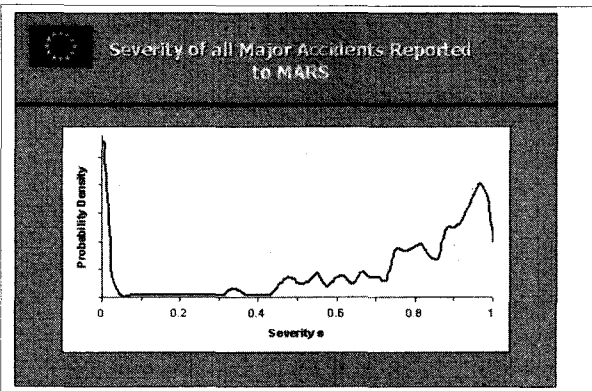
한편 근래 들어 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서 사고로 인한 화학물질의 노출로 많은 인명상 피해와 환경파괴가 발생되고 있다. EU의 중대사고보고지침(MARS Major Accident Reporting System)에 의하면 사고발생률이 높은 주요 산업체는 석유·정유·석유화학 산업·제약·농약 산업 등 주로 화학물질과 관련된 것으로 밝혀졌다.

(표 2-1) 그린화학 목적에 따른 실천원리

목적	주요 원리
독성없는 화학제품 생산	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사람의 건강과 환경에 미치는 독성이 없거나 최소화할 수 있는 합성방법 개발</li> <li>• 환경에서 쉽게 분해되는 제품 개발</li> <li>• 사고의 위험이 적은 제품개발로 사고로 인한 인명 및 환경상 피해를 최소화</li> </ul>
폐기물 발생이 없는 화학 제품 생산	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 폐기물의 사전발생 예방</li> <li>• 화학공정에서 보조제의 사용을 최대한 억제</li> <li>• 재생가능한 원료물질의 사용</li> <li>• 불필요한 파쇄공정을 최대한 억제</li> </ul>
에너지 효율이 높은 화학 제품 생산	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모든 원료물질이 제품에 최대한 포함될 수 있는 합성방법 개발</li> <li>• 독성을 낮추더라도 제품 고유의 기능은 손상되지 않는 합성방법 개발</li> <li>• 최적온도 및 압력을 유지할 수 있는 합성방법 개발</li> <li>• 에너지 효율을 극대화 할 수 있는 방법 개발</li> </ul>



<그림 2-3> MARS에 보고된 중대사고 발생추이



<그림 2-4> MARS에 보고된 사고의 심각성 정도

사고의 발생빈도와 피해규모가 갈수록 증대되고 있는데, 다음 <그림 2-3>와 <그림 2-4>에서 보면 1980년대부터 1990년대까지 화학물질로 인한 사고가 갈수록 증가하고 있음을 알 수 있으며 대부분의 사고의 피해규모가 매우 큰 것을 알 수 있다.

따라서 향후의 화학제품은 사고 원인이 될 수 있는 폭발성, 인화성, 확산속도 등을 고려하여 사고의 발생가능성 및 그 피해규모를 최소화할 수 있도록 개발되어야 할 것이다

한편 기존 화학제품에 비해 폐기물의 발생이 최소화 될 수 있는 제품을 생산하기 위해서는 화학공정에서 사용되는 모든 원료물질을 가능한 한 재생가능한 물질로 대체하여 사용하는 것이 바람직하다.

또한 불필요한 파쇄공정을 최대한 억제하여 폐기물의 발생을 사전에 예방한다.

그 외에도 화학공정에서 용매나 분리제와 같은 보조물질의



향후의 화학제품은 사고 원인이 될 수 있는 폭발성, 인화성, 확산속도 등을 고려하여 사고의 발생가능성 및 그 피해규모를 최소화할 수 있도록 개발되어야 할 것이다

한편 기존 화학제품에 비해 폐기물의 발생이 최소화 될 수 있는 제품을 생산하기 위해서는 화학공정에서 사용되는 모든 원료 물질을 가능한 한 재생가능한 물질로 대체하여 사용하는 것이 바람직하다.

또한 불필요한 파쇄공정을 최대한 억제하여 폐기물의 발생을 사전에 예방한다.

사용은 필수적이거나 가능한 한 그 사용을 억제하고, 만약 사용할 경우 무해한 보조제를 선택하여야 한다.

보조물질은 분자 또는 화학제품의 합성에서 특정 장애를 극복하기 위해 고안된 물질로, 용매뿐 아니라 분리액 등 많은 종류의 보조물질들이 널리 이용되어 왔다.

특히 용매 중 할로겐화 용매의 경우에는 효과가 좋아 널리 사용되어 왔지만 독성에 대한 우려가 점차 높아지고 있는 실정이다.

분리액의 경우에는 재결정화(recrystallization)와 크로마토그래피가 대표적인 방법으로 이용되는데 에너지 소모, 보조물질의 독성, 폐기물 문제 등이 제기되고 있다.

기존의 보조물질을 대체할 수 있는 방법에는 초임계 유체의 이용, 무용매 시스템, 수성(aqueous) 시스템, 고정화된 용매(immobilized solvent) 이용 등이 있다. 초임계 유체의 경우 온도 및 압력 변수를 변화시켜 용매의 특성을 조절할 수 있다는 점을 이용해 유해한 용매들을 대체할 수 있고, 무용매 시스템의 경우 여러 기업체 및 학계에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

그 외 에너지 효율이 높은 화학제품 생산을 위해서는 우선 화학물질의 제품화율을 극대화시켜 공정에 이용되는 모든 물질들이 최종 제품에 포함되도록 합성방법이 고안되어야 한다.

원자경제(Atom economy)란 모든 반응물질들이 최종 제품화되는 정도를 평가하는 것으로, 만약 모든 반응물질이 완전히 제품에 통합될 경우 그 합성경로는 원자경제학적으로 100%에 도달했음을 의미한다.

따라서 공정에 이용되는 물질의 제품화율을 극대화시키면 공정중에 환경으로 배출되는 물질이 최소화되므로, 가능한 한 화학제품의 원자경제적 효율을 극대화하도록 개발되어야 한다.

그의 독성을 낮추더라도 제품 고유의 기능은 손상되지 않는 합성방법과 함께 최적온도 및 압력을 유지하여, 화학제품 생산에 필요한 에너지 효율을 극대화시켜야 할 것이다.

### 3. 그린화학의 기법

그린화학의 목적과 원리를 실천하기 위한 노력으로 현재 사용되는 있는 주요 기법 등은 다음과 같다.

#### 가. 대체 원료물질

반응형태 또는 합성경로의 특성은 대부분 원료물질의 선택에 좌우되며, 원료물질의 선택은 합성경로의 효율뿐 아니라 공정으로 인한 환경 및 보건에 영향을 미친다.

즉, 제조업자들이 어떤 원료를 선택하느냐에 따라 해당물질을 취급하는 근로자, 공급자, 운송업자 등의 노출 및 위해성이 결정된다.

따라서 원료의 선택은 그린화학의 의사결정 과정 중 매우 중요한 부분이다.

현재 미국의 모든 유기화학물질의 98%가 석유원료로부터 합성된다.

또한 석유정제에 드는 에너지가 미국에서 사용되는 총 에너지의 15%를 차지하며 그 양은 점차 증가하고 있다.

석유를 유용한 유기화학물질로 전환하기 위해서는 산화과정을 거쳐야 하는데, 이 과정이 모든 화학물질 합성에서 오염을 야기하는 주요 공정이다.

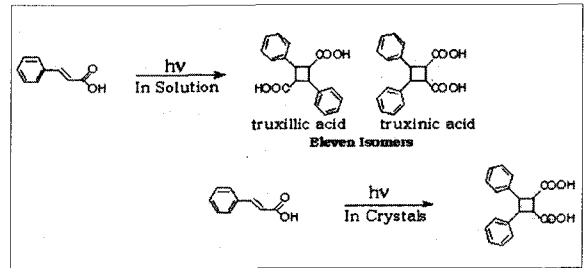
이러한 문제를 해결하기 위해서 대체원료를 개발하고 있는데 일반적으로 농업 및 생물학적 원료(예, 다당류 폴리머, 글루코즈 화합물 등)가 뛰어난 대체원료로 사용될 수 있다. 이외에도 요즘 연구가 활성화되고 있는 대체원료로는 빛이 있는데, 기존의 석유산화공정에서 사용된 중금속을 가시광선으로 대체할 수 있음이 밝혀졌다.

#### 나. 대체 반응물질

각 합성 공정에서 물질전환에 요구되는 반응물질을 평가하

기 위해 효율, 이용가능성(availability), 영향 등의 기준을 비교·평가해야 한다.

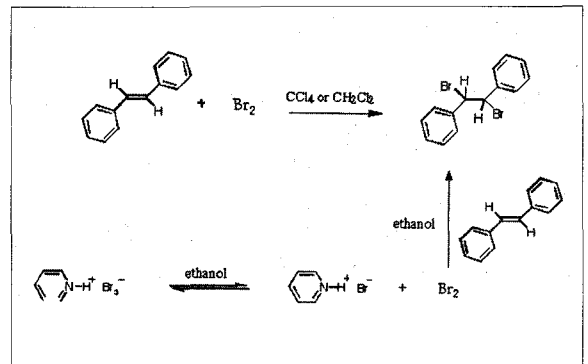
또한 물질전환 과정도 화학량(化學量) 적인가 또는 촉매작용을 하는가, 원자경제학적인가의 여부와 해당 반응물질의 사용으로 인해 발생하는 폐기물의 특성에 대해서 평가되어야 한다. 대체 반응물질에 대한 최신 경향은 다음 <그림 2-5>에 볼 수 있는데, Cinnamic acid의 이량체화(dimerization) 과정에서 과거의 방법은 11개의 isomer를 생산하여 불필요한 반응물질을 부산물로 만들었으나 그린화학 개념이 도입된 최근의 방법에서는 반응물질이 생성되지 않는다.



<그림 2-5> 그린화학을 이용한 Cinnamic acid의 이량체화  
 자료 : Bell, C.E., Clark, A.K., Taber D.F., Rodig, O.R. 1997, 『Organic Chemistry Laboratory: Standard and microscale experiments』 Saunders College Publishing, Philadelphia, 2nd Ed., Ch.32

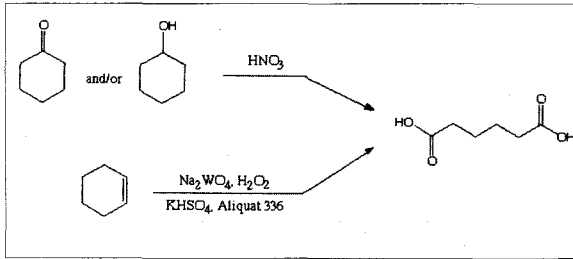
#### 다. 대체 용매

현재 용매는 전자산업, 페인트 및 코팅, 인쇄, 세정분야, 의약품 농약 등 여러 산업분야에서 사용되고 있지만 대부분의 경우 휘발성 유기화학물질(VOCs)이거나 독성이 있어 대체용매의 필요성이 더욱 커지고 있다.



<그림 2-6> 그린화학을 이용한 Olefin의 브롬화

자료 : Bell, C.E., Clark, A.K., Taber D.F., Rodig, O.R. 1997, 『Organic Chemistry Laboratory: Standard and microscale experiments』 Saunders College Publishing, Philadelphia, 2nd Ed, Ch.32



<그림 2-7> 그린화학을 이용한 Adipic acid 합성

자료 : Bell, C.E., Clark, A.K., Taber D.F., Rodig, O.R. 1997, 『Organic Chemistry Laboratory: Standard and microscale experiments』 Saunders College Publishing, Philadelphia, 2nd Ed, Ch.32

용매의 사용 추세는 무용매 사용> 물> 저독성용매 순으로 전환되고 있으며 이에 따라 수성시스템(aqueous system), 이온 용액(ionic liquids), 고정화된 용매(immobilized solvent), dendrimer, amphiphilic star polymer, 초임계 유체(supercritical fluid) 등과 같은 대체용매가 개발되고 있고 ethyl lactate, butyl lactate, methyl siloxanen 등의 용매 사용이 점차 증가하고 있다.

실례로 <그림 2-6>의 올레핀의 브롬화과정을 보면 과거에는 사염화탄소(CCl4)가 용매로 사용되었으나, 최근에는 저독성 용매인 에탄올이 사용되거나, <그림 2-7>의 Adipic acid 합성과 같이 아예 용매가 사용되지 않는 방법이 개발되기도 하였다.

#### 라. 대체 제품 · 대상 분자

화학물질 분자의 일부 조작을 통해 화학물질의 효능은 유지하면서 독성 또는 유해성을 줄일 수 있으며, 이를 위해서는 분자의 어떤 부분이 유해한 기능을 하는지 밝히고 그 부분을 제거하는 연구가 요구된다. 최근 대체제품의 개발이 활발한 분야는 내분비계 장애물질로 확인되었거나 의심되는 물질로, 특히 플라스틱의 첨가제인 비스페놀 A와 프탈레이트, 노닐페놀류 등에 대한 대체제품 개발에 많은 투자와 관심이 집중되고 있으며 TBT Tri-butyl Tin, 유기주석계 방오제에 대한 대체물질은 이미 개발되어 일본 등의 국가에서는 상품화되고 있다.

#### 마. 공정분석 화학

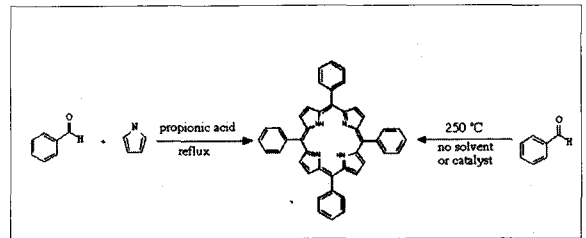
공정분석 화학을 통해 화학물질 합성 중 반응조건을 실시간으로 측정하고 그 결과에 따른 반응변환 능력을 평가할 수 있다.

공정분석 화학분야에서 여러 연구가 수행되고 있으며 특히 생명공학분야에서 적용가능성이 높다.

#### 바. 대체 촉매

지난 수 십년간 화학, 특히 산업화학에서 크게 발전한 분야는 촉매분야이다. 촉매는 화학공정의 효율성을 높일 뿐 아니라 환경적으로 많은 이점이 있다. 그 예로 촉매의 개발 및 사용으로 공정에 드는 반응물질의 양과 폐기물 발생량을 저감할 수 있다.

하지만 일부 촉매, 특히 중금속류의 촉매는 독성이 매우 높아 저독성 촉매를 개발하거나 촉매를 사용하지 않는 화학공정



을 개발하는게 그린화학의 최근 추세이며, 이는 다음 <그림 2-8>에서와 같이 5,10,15,20-meso-Tetraphenylporphyrin 를 촉매없이 합성하는 방법을 보면 확인할 수 있다.

<그림 2-8> 그린화학을 이용한 5,10,15,20-meso-Tetraphenylporphyrin 합성

자료 : Bell, C.E., Clark, A.K., Taber D.F., Rodig, O.R. 1997, 『Organic Chemistry Laboratory: Standard and microscale experiments』 Saunders College Publishing, Philadelphia, 2nd Ed, Ch.32

다음호 계속