

유해화학물질관리를 위한 그린화학(GC)제도 연구(2)

박정규

한국환경정책·평가연구원 연구위원

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



박정규

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

제3장 그린화학의 국제적 시행현황

그린화학은 1990년 초 미국에서 처음 그 개념이 도입되었는데, 1990년 미국의 오염예방법(the Pollution Prevention Act)이 제정된 후 EPA의 오염예방 및 독성물질국(OPPT)은 기존의 화학제품과 화학공정을 사람의 건강과 환경에 덜 유해한 것으로 대체할 수 있는 아이디어를 개발하게 되었다. 그 결과 1991년 『사전오염예방을 위한 대체합성경로』라는 연구지원프로그램을 착수하였고, 이 프로그램이 후에 그린화학프로그램으로 확대되었다. 그린화학프로그램을 통해 사전오염예방이 효과적으로 이루어짐을 확인한 미국 정부는 1995년 3월 『Presidential Green Chemistry Challenge Program』을 실시하여, 이를 통해 미국은 자국 내에서 화학기술의 혁신을 통한 오염물질배출과 자원이용 저감효과 및 학계의 그린화학 연구 활성화를 달성하게 되었다. 이러한 미국의 성공적인 사례는 유럽과 아시아의 다른 국가들을 고무시켰고, 이로 인해 영국에서는 그린화학네트워킹이 창립되었다. 또한 이탈리아, 독일, 오스트레일리아에서는 그린화학상을 포함한 여러 활동들이 시작되었다. 이들 국가들 이외에도 OECD, IUPAC, CEFIC, IFCS 등 국제기구·국제활동 등은 화학물질 관리와 관련된 의제에 그린화학을 포함하기 시작하였다.

이중 OECD는 1998년 『지속가능한 화학(이하 그린화학)』이라는 환경적으로 건전한 화학제품을 생산하기 위한 새로운 프로젝트를 착수하였고, 그 첫 번째 단계로 1998년 봄 미국 EPA가 중심이 되어 OECD 각 회원국의 그린화학에 대한 현황조사를 실시하였다. OECD의 조사결과는 다음 <표 3-1>과 부록 I에 수록하였다. 그 후 1998년 10월 이탈리아에서 제1차 그린화학 워킹샵이 개최되어 현재의 그린화학 관련기술수준을 확인하고 향후 추진방향을 도출하였으며, 2000년 10월 제 2차 그린화학 워킹샵이 일본에서 개최되어 그린화학 추진의 근간이 되는 R&D사업을 도출한 바 있다.

OECD의 1차 그린화학 워킹샵에서는 다음과 같은 OECD에 대한 권고사항이 결의되었다.

첫째, 혁신적인 그린화학기술의 개발 및 연구를 적극 지원하고 권장할 것.

둘째, 화학산업체, 연구소 및 대학의 과학자들이 그 동안 수행한 그린화학의 성과를 확인할 것.

셋째, 인터넷 등을 통해 그린화학 관련정보를 확산시킬 것.

넷째, OECD국가들에게 그린화학의 시행지침을 개발·제공하여 향후 그린화학에 대한 비회원국들의 관심을 유발할 것.

다섯째, 화학교육에 여러 단계에 그린화학의 개념과 원리를 도입하여 교육시킬 것 등이다.

따라서 OECD회원국인 우리나라도 화학물질 관리와 사전오염예방의 원칙을 준수하기 위해 그린화학의 개념 도입과 함께 선진국에서 시행하고 있는 그린화학 현황을 파악하는 것이 요구된다. 이에 다음과 같이 그린화학을 연구 및 개발프로그램, 교육 및 홍보프로그램, 정부의 활성화방안, 정보수집 및 공유프로그램, 관련학술단체로 나누어 각 국의 시행현황을 조사하여 다음과 같이 정리하였다.

<표 3-1> OECD 조사결과에 따른 각국의 그린화학시행현황

국가	연구 및 개발활동	교육 및 홍보활동	정부의 활성화활동	정보수집 및 공유활동
호주	1	1	-	0
벨기에	11+	5	3	0
캐나다	-	-	1	0
프랑스	6+	6+	3	0
독일	12+	7	3	0
이탈리아	13+	10+	5	0
일본	8+	9	7	0
한국	2+	2+	3	0
스웨덴	1+	-	3	0
스위스	1+	2	-	0
영국	4+	2+	4	0
미국	12+	9+	3+	0
EniChem*	6+	-	2	-
Euro*	1	-	-	-

*하나 이상의 국가에서의 활동사항을 보고한 산업체

자료 : OECD, 1999. 『Proceedings of the OECD workshop on sustainable chemistry』

1. 연구 및 개발프로그램

대부분 그린화학을 실행하고 있는 국가에서의 관련 연구 및 개발프로그램의 범주는 크게 재생·재활용이 가능한 원료 이용연구, 에너지 효율을 증가시키거나 생산대비 에너지 사용 저감연구, 잔류성·생물농축성·독성물질 사용저감방안 연구로 구분된다. 이를 좀더 세분화하면 다음과 같다.

- ① 유해물질의 사용 및 발생저감을 통해 인체건강과 환경에 미치는 영향을 고려한 제품과 공정 디자인 추구
- ② 오염물질 배출 및 부산물, 잔재물, 폐기물 발생을 최소화할 수 있는 공정개발
- ③ 다양한 제조공정에 실용적으로 널리 적용할 수 있는 공정 디자인 추구
- ④ 에너지와 자원소비를 저감하고 원료 및 화학물질의 순환적 이용을 증진시킬 수 있는 기술/운영 체계 개발
- ⑤ 재생가능한 원료의 이용을 증진시킴으로써 재생불가능한 원료에의 의존도를 저감시키는 혁신기술 개발
- ⑥ 원료들을 재생가능화하여 환경자원을 보존할 수 있는 혁신제품 개발
- ⑦ 인체건강 및 환경에 미치는 화학제품과 공정의 결과를 예측하는 개념 및 방법 개발

한편 R & D의 주체는 화학산업체, 연구단체 및 학계 등이었으며, 몇몇 정부와 관련협회들도 연구에 참가하기도 하였다. 각국의 R & D 시행현황은 다음과 같다.

가. CECD

그린화학을 이미 실시하는 국가를 보면 정부, 산업체, 학계 등으로 구성된 그린화학 협력체계가 운영되고 있는데, 이와 같은 협력체계는 특히 그린화학의 기초가 될 새로운 과학 및 기술의 개발과 보급에 중점을 두고 있다. OECD는 그린화학에 대한 OECD의 역할을 회원국들이 그린화학 프로그램을 구축하고 정부, 학계 및 산업체에서 이를 수행할 수 있도록 도와주는 것으로 규정하고 있다.

한편 OECD는 그린화학의 주요 기술분야를 크게 세 분야로 나누어 여러 활동을 계획하고 있다. 주요 기술분야는 첫째, 대체합성을 이용하는 것이다.

대체합성이란 재생 가능성이 있고 인체 및 환경에 대한 독성이 상대적으로 적은 대체 물질을 사용하고, 덜 유해하고 촉매 작용이 가능한 시약을 이용하며, 효율 및 선별을 위해 생합성, 생촉매작용, 생명공학에 기초한 화학물질 변환을 이용하는 것이다.

둘째, 대체용매 및 반응조건을 이용하는 것이다. 이에 해당하는 예에는 환경에 대한 잠재 위해성을 줄일 수 있는 용매를 디자인하고 이용하는 것, 생산된 물질의 선별성을 증가시키고 분리공정의 dematerialization이 가능한 반응 조건을 디자인하는 것, 투입 에너지 요구량과 과도한 에너지 이용에 따른 환경

적 영향을 저감시키는 방향으로 화학물질 변환을 디자인하는 것 등이 있다.

셋째, 보다 안전한 화학물질로 디자인하는 것이다. 이를 위해 독성원리를 통합하는 분자구조 디자인과 생물 및 생태계에 대한 독성을 최소화하는 활동기작 등을 이용한다.

특히 연구 및 개발프로그램을 위해 OECD는 다국적 연구 협동체계를 지원하는데, 이는 각 국가들의 과학기금 재단을 위한 협동체제로서 다른 국가들의 연구자들 간의 협력 증진을 위한 다국적 연구기금으로 구성되어 있다.

나. 미국

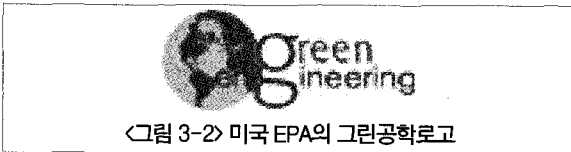
미국 EPA에서 추진하는 사전오염예방정책에는 그린화학(Green Chemistry, GC)을 포함하여 환경을 위한 디자인(Design for Environment, DfE), 그린공학(Green Engineering, GE) 등 여러 정책이 있다.

우선 그린화학의 경우 연구 및 개발사업은 미국 EPA의 그린화학프로그램에서 추진되고 있는데, 연구활성화를 위한 사업으로는 『Presidential Green Chemistry Challenge Program』이 가장 대표적이며 그 외 EPA의 『소규모사업장 혁신 연구사업 프로그램』과 EPA/NSF의 『지속가능한 환경을 위한 기술개발프로그램』에서 그린화학과 관련된 연구가 수행중이다. 미국의 그린화학 연구는 OECD에서와 같이 대체합성경로 연구, 대체반응조건연구, 안전한 화학물질의 디자인 등 세 분야로 나뉘어 진행되고 있으며, 『Presidential Green Chemistry Challenge Program』을 통해 1996년부터 현재까지 7년간 5개 분야에서 연구성과가 뛰어난 사업에 대해 수상을 한 바 있다.



반면 그린공학은 그린화학을 포함하는 포괄적인 개념으로, 그린화학이 환경적으로 안전한 화학제품 및 공정을 디자인하는데 그친 데 반해 그린공학은 그와 같은 화학제품 및 공정의 디자인·상업화·사용까지 포함하는 확대된 개념이다. 그린공학은 교육, 소프트웨어, 산업체, 보급활동의 4개 부문으로 이루어지고 있으며, 특히 “그린” 개념에 대한 기초교육을 중시해 학부 학생들을 위한 교재개발 등에 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 화학공학자들이 공정 디자인을 할 때 화학물질의 위

해성을 사전에 평가할 수 있는 소프트웨어를 개발하여, 새로 개발된 물질이 시장에 출시되기 전에 화학물질의 안전성을 확인할 수 있도록 하고 있다. 산업체에서는 학습 교제, 방법 및 사례 연구들을 변화시켜가며 지속적인 교육 과정을 수행하고 있고, 정부는 그린공학 관련 교육과정, 사례 연구, 공정 디자인 방법 등에 관한 정보의 원활한 흐름을 위해 학계 및 산업체에 관련 자료들을 제공하고 있다.



환경을 위한 디자인(이하 DfE)이란 「기업체의 사업관련 의사결정과정에서 건강과 환경의 개념을 고려할 수 있도록 주요 정보를 제공함으로써, 산업체가 자발적으로 환경을 개선하도록 하는 정부와 산업체의 제휴프로그램」이다. 즉, 그린화학프로그램과 그린공학프로그램 등에서 개발된 기술과 정보를 관련 산업체에게 제공하여 산업체가 적극적으로 이들 정보를 의사결정과정에서 활용할 수 있도록 하는 제도이다.

관련 활동으로는 첫째, 산업체 내에서 특정 기능을 수행하는 기술·제품·공정들 및 이와 연관된 오염방지 기회 규명, 둘째, 대체물질의 위해성·효능·비용의 평가 및 비교, 셋째, 관련 정보를 산업체에 배포, 넷째, 지속적인 환경개선과 정보사용 장려를 위한 인센티브 제공 등이 있다. DfE 프로젝트는 잠재적으로 건강, 안전성 및 생태위해성을 저감시키고, 효율 및 소비자 수용성(customer acceptance)을 증가시키며, 근로자의 사기와 생산성을 높이는 장점을 갖는다. 또한 규제 부담을 줄이고, 이해당사자간의 대화, 협동 채널을 증진시키며 사업 및 시장기회를 확장시킬 수 있다. DfE의 접근방식에는 청정기술대체효과평가, 통합환경관리체계, 전생애평가, Formulator initiative, Best shop practices, 공급체계의 녹색화 등이 있다.

특히 이중에서 청정기술대체효과평가는 대체된 청정기술의 사용효과를 과학적 평가(즉, 위해성평가)와 비용효과 분석을 통해 산업체가 새로운 기술을 도입하는데 많은 효과가 있음을 확인시켜주고 있다.

다. 일본

일본에서의 그린화학 연구는 「선사인 프로젝트」 등 국가 R & D사업에서 추진되고 있으며, 일본화학협회와 일본화학혁신



1970~80년대에 일본 통산성은 에너지 및 환경분야에서 3개의 독립된 프로젝트 - 신에너지에 관 「Sunshine project」, 에너지 보존에 관한 「Moonlight project」, 환경기술에 관한 「R & D project」 - 를 시행한 바 있다. 이때 에너지와 환경분야에서의 업무가 상당부분 겹치거나 관련성이 있다는 점을 깨닫고 통산성은 이 세 프로젝트를 통합하여 1993년 「뉴선사인 프로젝트(New Sunshine Project)」를 새로이 시작하였다. 이 프로젝트의 목적은 에너지 및 환경 문제를 해결하기 위해 혁신적인 기술을 개발하고 지속가능한 성장을 이루는 것이다.

연구원 등에서 관련사업이 진행되고 있다.

1) 선사인 프로젝트

1970~80년대에 일본 통산성은 에너지 및 환경분야에서 3개의 독립된 프로젝트 - 신에너지에 관 「Sunshine project」, 에너지 보존에 관한 「Moonlight project」, 환경기술에 관한 「R & D project」 - 를 시행한 바 있다. 이때 에너지와 환경분야에서의 업무가 상당부분 겹치거나 관련성이 있다는 점을 깨닫고 통산성은 이 세 프로젝트를 통합하여 1993년 「뉴선사인 프로젝트(New Sunshine Project)」를 새로이 시작하였다. 이 프로젝트의 목적은 에너지 및 환경 문제를 해결하기 위해 혁신적인 기술을 개발하고 지속가능한 성장을 이루는 것이다.

뉴선사인 프로젝트는 다음과 같이 3개의 체계로 이루어져 있다.

첫째는 혁신적인 기술개발로서, 지구 온난화 방지계획을 수행하기 위해 혁신적인 에너지 및 환경기술이 요구된다.

둘째는 국제적인 대규모의 협동 연구프로그램으로 「New Earth 21」이 수행되고 있다. 셋째는 적정 기술에 관한 R & D 협력사업으로, 협동연구와 증강된 개발 프로그램은 에너지 및 환경 기술을 협력국가에서 실용화 될 수 있도록 노력하고 있다. 한편 뉴선사인 프로젝트의 주요 연구분야에는 재생가능한 에너지, 화석연료 이용의 개선, 에너지 운송 및 저장, 조직화기술, 환경기술, 에너지 및 환경 측면과 관련된 기초기술, 선도 연구 프로그램, 계획에 기초한 창조적인 연구 및 개발 증진 프로그램

램 등이 있다.

이와 같은 뉴선사인 프로젝트 중 그린화학과 관련된 세부연구분야가 『Simple Chemistry』로 이는 화학 공정을 단순화시켜 에너지와 자원의 절약을 최대화하고 오염물질 배출을 최소화하는 혁신적인 개념을 도입하는데 그 목적이 있다. 일본 화학업체들은 에너지와 자원 절약을 최대화하는 공정 기술 개발에 노력해왔고, 1994년 일본화학엔지니어협회에서는 산학 협동으로 에너지와 자원 절약 기술을 연구하기 시작했다(〈표 3-2〉). 일본화학엔지니어협회의 건의에 따라 1995년 일본 정부(통산성)는 예산을 투입하여 『Simple Chemistry』 프로그램을 개시하였고, 연구의 주체는 일본화학엔지니어협회, 일본화학혁신연구원, 일본화학산업협회, 신에너지·산업기술개발연구소와 협의하여 선정하고 있다.

〈표 3-2〉 일본의 Simple chemistry program의 주요 프로젝트

주요 프로젝트명	연구 참여자
lower olefin으로의 naphtha 촉매전환	4업체, 3대학, 1국가기관
light alkane의 선택적 산화를 위한 새로운 촉매 및 화학반응공정	5업체, 7대학
고체 촉매를 이용한 단순 합성공정	3업체, 1국가기관
반응 및 분리 공정을 통합한 새로운 막 기술	4업체, 8대학, 1국가기관

자료: 일본그린화학네트워크, <http://www.gscn.net>

2) 초임계유체 연구프로젝트

초임계 유체에 관한 연구 프로젝트는 물질및화학조사연구원, 산업과학및기술청, 통산부, 일본화학혁신연구원이 참여하는 프로젝트이다. 환경 친화적인 초임계 유체에는 주로 이산화탄소와 물이 사용되며, 초임계 유체를 이용하는 기술을 통해 에너지를 절약하고 유해한 유기 용매 사용을 피하며 유해폐기물을 분해할 수 있다. 이 프로젝트는 1997-1999년 동안 신에너지·산업기술개발연구소 등에 의해 수행되었다.

3) 일본화학협회의 연구활동

학계, 정부 및 산업체와의 협동 연구의 예로서, 일본화학협회와 지구혁신기술연구소는 이산화탄소 저감 기술과 친환경적인 화학공정이라는 프로젝트를 공동으로 수행하였다. 이산화탄소 저감기술과 관련하여 중점적으로 연구되는 분야는 크게 ① 비화석연료(태양에너지 등)부터의 새로운 에너지원 개발, ② 에너지 절약을 위한 혁신적인 화학기술, ③ 촉매, 전기화학, 광화학공정, 생체시스템을 통한 이산화탄소 전환 증진의 3가지이다. 그리고 친환경적인 화학공정 프로젝트에서는 친지

구환경 및 친천연자원에 중점을 두고 ① 폐기물(부산물)의 양, ② 물질의 위험성, ③ 에너지 소비, ④ 반응의 복잡성 등 4가지 관점으로부터 화학반응을 조사하고, E-factor와 원자이용도(degree of atom utilization)를 사용하여 20개 이상의 관련 화학공정을 평가한다. 이 두 프로젝트를 통해 교육부의 재정적 지원을 받아 신촉매 디자인과 촉매화학공정에 관한 연구가 시행된 바 있다. 또한 화학물질 안전성과 관련하여 일본화학협회는 환경 및 위해성 방지를 위한 두 전문가 그룹과 함께 『환경 및 안전을 위한 위원회』를 설립하였다.

4) 일본화학혁신연구원의 연구활동

일본내에서 그린화학에 대한 활발한 연구를 수행하고 있는 일본화학혁신연구원의 연구활동을 보면, 상업화된 연구결과로는 acrylamide의 효소합성, TBT에 대한 대체 방오제, 가성소다 생산공정의 변환 등이 있다. 1985년 도입된 nitrile hydratase에 의한 acrylamide의 효소합성은 Nitto 화학회사가 개발한 것으로 미생물의 활성을 4배나 촉진시켰다. 또한 인체 조건에 미치는 안전성 문제로 인해 1990년 사용이 금지된 TBT에 대해 여러 페인트 제조업체들은 TBT보다 독성이 적은 대체물질을 세계 최초로 개발하였다. 마지막으로 1976년 수은이 미치는 잠재적인 영향으로 인해 기존에 가성소다 생산을 위해 사용되었던 수은 방식이 금지되었고, 그 후 80% 이상의 공정이 이온교환막 방식으로 변환되어 수은 방식보다 약 30% 높은 에너지 효율을 나타내고 있다.

이상과 같이 일본내에서의 그린화학에 대한 연구 및 관련활동은 매우 활발하게 진행되고 있었다.

라. 독일

1) 개발도상국에서의 그린화학 현황연구

브라질과 독일의 대학에서 개발도상국의 그린화학 및 에너지 사용에 대한 연구 프로젝트를 수행한 바 있다. 개발도상국들은 많은 양의 생물량(biomass)을 가지고 있으며, 이들 국가의 재생가능한 자원 중 상당 부분이 에너지와 산업용 원료로 이용될 수 있다. 1995년 브라질에서 연료(석탄, 석유)와 원료 생산을 위해 생물량을 이용하는 연구가 시작되었는데, 이 프로젝트의 목적은 환경적으로 건전한 상황에서 생물량을 화학물질을 위한 에너지 및 원료로 이용할 수 있는 석유와 석탄으로 전환시키는 것이다.

화석연료로 사용하는 것 이외에도 생물량으로부터 숲을 사

용하기도 한다. 철강을 생산하는 다른 모든 국가들은 석탄으로부터 코크스를 이용하는 반면, 브라질의 철강 공장에서는 생물량으로부터의 숯을 이용하였다. 1994년 브라질의 철 생산에서 무쇠의 34%, 강철의 18%가 숯을 이용하여 생산되었다. 프로젝트에서는 낮은 온도 전환의 열촉매 공정이 생물량에 대한 유망한 기술인지의 여부를 밝히기 위해 노력하였고, 그 결과 숯이 화석연료의 대체 원료로 이용될 수 있음을 알아냈다. 생물량은 석유 및 석탄과 유사한 제품으로 전환될 수 있고, 따라서 이러한 제품은 석유화학, oleochemistry 또는 에너지 이용과 연계될 수 있다.

결과적으로 이 공정은 유해 유기염소 화합물(다이옥신 등)을 지속적으로 분해하고, 반응조건이 적기 때문에 soft chemistry로 분류될 수 있다. 이후 적절한 주요 생물량 및 생물량 폐기물의 동정, 생물량의 이용가능성 및 지리적 분포, 질량평형 및 제품의 이용, 국소적, 지역적 및 지구적 생태학적 측면, 경제 및 마케팅, 사회적 측면 및 수용, 남반구의 다른 국가들에 대한 관련성 등의 연구도 진행되었다.

2) 독일연방교육연구부

독일에는 연방정부로부터 지원받는 환경연구활동 체계가 있고, 이를 통해 각 부서에서 승인된 연방 차원의 모든 연구 및 개발(환경 보호, 과학 및 기술, 농업, 운송, 경제 등)이 이루어진다. 그 주요목적은 지속가능성 지향, 환경부담 및 환경보호 비용 저감, 경쟁력 증가와 전세계 환경상품 시장의 확대, 산업체의 일자리 보존 등이다.

연구분야에는 미화로 약 6억 달러가 지원되는데, 첫째, 지역 및 지구적 환경 공학(교외, 도시 집약, 지구적 변화), 둘째, 지속가능한 경제로의 접근(정정 생산, 디자인에 있어서 생태적인 제품, 환경관리), 셋째, 환경교육의 세 분야로 나뉜다.

이들 중 지속가능한 경제로의 접근법은 경제의 잠재적인 혁신성을 활성화시키고, 환경에 대한 부담을 줄이며, 자원 소비로부터의 경제 성장을 완화시키고, 비용저감 가능성 개발과 독일 환경산업의 경쟁력 강화에 그 목적이 있다.

한편 독일연방교육연구부는 『화학연구 및 기술 프로그램』을 통해 그린화학 관련 연구에 대한 자금을 지원하는데, 해당 연구에는 산업 관련 주요 기술들에 대한 경쟁력 있는 연구 및 개발 프로젝트, 지속가능한 개발에의 기여(원료 고효율, 폐기물 및 배출 저감, 에너지 소비 감소, 안전 공정 등), 산학 협동체계의 증진, 산업 경쟁력 강화 등이 있다.

이외에도 다가올 세대에 대비하여 촉매, 초분자 시스템, 화학



독일에는 연방정부로부터 지원받는 환경연구활동 체계가 있고, 이를 통해 각 부서에서 승인된 연방 차원의 모든 연구 및 개발(환경 보호, 과학 및 기술, 농업, 운송, 경제 등)이 이루어진다. 그 주요목적은 지속가능성 지향, 환경부담 및 환경보호 비용 저감, 경쟁력 증가와 전세계 환경상품 시장의 확대, 산업체의 일자리 보존 등이다.

공정의 비선형 역학, 조합(combinatorial) 화학, 미세반응기술 등의 연구에도 관심을 기울이고 있다. 촉매는 지속가능성의 측면에서 화학 및 화학공정을 증진시키는 데에 중요한 역할을 한다.

독일연방교육연구부가 지원하는 신촉매 개발 프로젝트의 예로서 합성고무의 생산을 들 수 있다. 이 공정은 기체상 반응에 기초하기 때문에 운송을 위한 용매가 필요하지 않고, 공정 단위의 수를 줄이며, 반응조의 디자인을 단순화시킨다. 이로 인해 에너지 소비와 연료 사용이 줄어들었고, 오늘날의 85% 효율이 약 99%까지 달성될 수 있으리라 예상된다.

또한 『비선형 규제 및 관리 방법을 통한 모형근거(model-based) 공정』에 관한 시험적인 프로젝트가 실시되었고, 그 결과 기존 공정과 비교하여 반응 시간이 약 25%까지 감소했으며 작동 시간이 감소되고 오염물질 배출이 저감되었다.

미세반응기술은 화학물질 생산공장을 집결시키기 위해 이용될 수 있는 미세구조 구성을 발전시켰다. 이러한 방식의 이점은 첫째, 이동가능한(mobile) 공장에서 유해 또는 불안정한 화학물질이 요구되는 시점과 장소에서 생산될 수 있기 때문에 저장 및 운송에 대한 높은 비용을 줄일 수 있다.

둘째, 많은 열을 생산하는 공정이 적절히 관리되고 안전한 방식으로 이루어질 수 있다.

셋째, 대규모 공장에서의 비정상(unsteady) 상태 또는 폭발 상태에서의 공정은 관리가 매우 어려운데 반해, 미세반응조는 제품이 높은 선별력과 양질로 생산되는 상황에서 외부 공정에 개방되어 있다.

종합적으로 볼 때 독일내에서 그린화학과 관련하여 각기 다른 단계에서 매우 다양한 접근이 독일연방교육연구부의 지원 하에 이루어졌고, 이를 위해 정부, 산업체, 학계 및 협회 등이 노력해 왔다. 그러나 보다 강화된 협동체계가 요구되며 과학 및 기술 개발은 좋은 수단이 될 것으로 예상하고 있다. 또한 파이프 말단 기술 대신 기체상 고분자화 기술을 이용하는 사례와 같은 통합된 환경 접근방식이 국제적 협력 분야에서 요구된다.

마. 스웨덴

스웨덴에서 그린화학과 관련한 정부프로그램은 세가지가 있으며, 모두 기술및산업발전국가위원회에서 시행하는 프로그램이다. 첫째, 『환경적으로 지속가능한 표면 처리 프로그램』은 기술및산업발전국가위원회, 연구소, 학회, 산업체가 공동으로 수행하는 프로그램으로 참여업체들은 프로젝트 비용의 50%를 지원한다. 이 프로그램은 1994년에서 1997년까지 저온 고형분 코팅, 카드뮴 및 크롬을 제거한 공정에 대해 연구하였고, 1997년에서 1999년까지 인 공정, 배출수로부터 중금속 재생, 표면처리 기술에 대한 일반적인 정보에 주력하였다. 둘째, 『천연자원에 기초한 세계 센터』는 왕립기술연구원을 기본으로 구축되었고 기술및산업발전국가위원회, 왕립기술연구원, 산업체의 협동 하에 수행되었다. 주된 목적은 전체 또는 부분적으로 천연 자원을 이용한 안전성 있는 세계 정보 체계를 구축하는 것이다. 셋째, 『재생가능한 자원으로부터의 양수성(amphiphilic) 폴리머 센터』인데, 본 센터는 Lund 대학에 기초하고 기술및산업발전국가위원회, Lund 대학, 산업체의 동의에 의해 이루어졌다. 설립목적은 양수성 폴리머의 생산과 특성에 대한 기초 연구를 수행하여 섬유소 및 녹말과 같은 재생가능한 자원의 이용을 돕는 것이다.

바. 영국

그린화학연구네트워크는 영국 공학물리학연구위원회의 자금지원을 받으며, 연구진행 및 기술이전을 가속화시키기 위해 그린화학 관련 전문가와 다양한 단체들이 협동할 수 있는 기회를 제공하는 네트워크이다. 설립목적은 첫째, 산업체와 학계간, 화학자와 공학자간 논의를 위한 포럼으로서 역할을 수행하고, 둘째, 그린화학공정을 상업적으로 적용시키기 위해 소규모 연구의 확대에 필요한 연구를 촉진하고 장려하며, 셋째, 청정합성 및 대체반응매체 분야의 근로자와 관련 공학자간의 협력을

증진시키는 것이다. 주요 분야는 청정합성과 대체반응매체의 두 분야이며, 그 예는 다음 <표 3-3>과 같다.

분야	해당 사례
청정합성	<ul style="list-style-type: none"> 선택적 공정을 통해 화학물질 합성에서 폐기물 발생을 저감시키고 원자이용율을 늘림 보다 지속가능한 원료 및 공정으로 전환 작업 단순화와 촉매재생 촉매로 반응물질 대체
대체반응매체	<ul style="list-style-type: none"> VOC 이용과 손실(loss)을 저감시킴 보다 환경친화적이고 무독성인 용매로 전환 보다 지속가능한 공정으로 전환

한편 그린화학연구네트워크에서는 청정합성 및 공학과 대체반응매체로 하위 네트워크 그룹을 만들어 워크샵을 개최하고 그린화학연구 및 적용에 관한 논의그룹을 구성할 계획이다. 이를 위해 그린화학연구네트워크는 하위그룹의 관심사를 반영한 워킹샵을 해마다 개최하고, 전자메일, 연구자들간의 방문교환, 비디오 회의개최, 소식지 발간 등을 수행하고 있다.

2. 교육 및 홍보프로그램

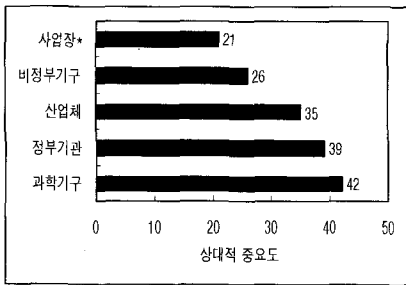
가. OECD-IUPAC

2001년 이탈리아 베니스에서 IUPAC와 OECD는 그린화학 교육에 관한 워킹샵을 개최한 바 있다. 본 워킹샵은 에 의해 주 관되었으며 정부기구, 학계, 산업체, 화학협회, 산업협회, 환경 연구원 등의 대표들이 참석하였다. 그린화학 교육에 관한 OECD-IUPAC 워킹샵에서의 중점 사항은 다음의 다섯 가지로, ① 그린화학을 교육시스템에 접목시킬 수 있는 기존의 정부 및 산업체 프로그램(R&D), 수상제도, 정보, 수단 등), ② 기존의 그린화학 교재, 수단, 수행근거, ③ 그린화학 교육을 실시하는 교육 분야, ④ 새로운 교재·수단을 통한 그린화학 교육프로그램 노력 및 수행, ⑤ 그린화학 교육프로그램 수행에 필요한 책임 및 권고사항 등이다.

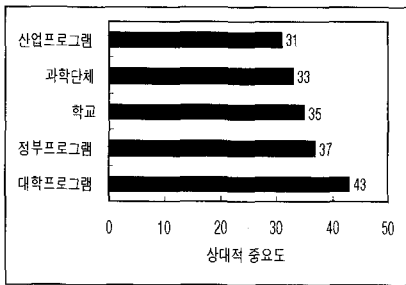
한편 독일, 이탈리아, 영국, 미국, 네덜란드, 호주 등 총 20개 국가의 44개 기관에서 자국의 그린화학 교육현황에 대해 IUPAC 에 워킹샵 보고서를 제출한 바 있다. 그 중 그린화학 교육프로그램의 주요 참여대상 연구원·기관, 그린화학과 교육체계의 주요 통합원, 주요 수단 및 교재, 관련 주요 프로그램·프로젝

트 등 세부적인 조사내용을 바탕으로 얻은 결과는 다음과 같다. 우선 그린화학 교육프로그램의 주요 참여대상 연구원·기관으로는 다음 <그림 3-3>에서 나타난 바와 같이 과학기구, 정부기관, 산업체 등이며, 산업체의 참여도가 가장 낮았다. 또한 그린화학을 기존 교육체계에 접목시키는 주요 방법은 대학과 정부프로그램이었으며, 교육수단은 온라인과 도서의 중요

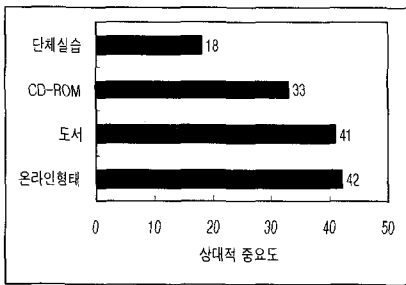
<그림 3-3> 그린화학교육 프로그램의 주요 참여대상 연구원·기관
 자료 : OECD, 1999. 『Proceedings of the OECD workshop on sustainable chemistry』



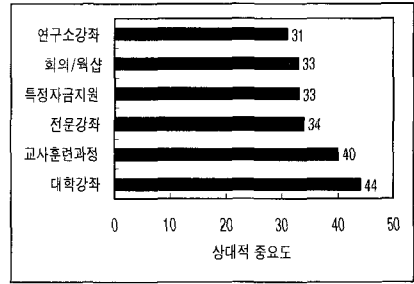
<그림 3-4> 그린화학 교육체계의 통합수단
 자료 : OECD, 1999. 『Proceedings of the OECD workshop on sustainable chemistry』



<그림 3-5> 그린화학교육의 주요수단 및 교재
 자료 : OECD, 1999. 『Proceedings of the OECD workshop on sustainable chemistry』



<그림 3-6> 그린화학교육 관련 주요 프로그램·프로젝트
 자료 : OECD, 1999. 『Proceedings of the OECD workshop on sustainable chemistry』



도가 가장 높았다(<그림 3-4>와 <그림 3-5>). 마지막으로 관련 주요 프로그램·프로젝트에서는 교사훈련과정과 대학강좌가 높은 중요도를 나타냈으며 이외에도 연구소강좌, 회의·워크샵, 특정자금지원, 전문강좌 등이 실시되고 있었다(<그림 3-6>).

나. 미국

산업체와 학계의 그린화학을 통한 오염방지 협력을 가속화시키는 방법중 하나는 화학 교과과정에 오염방지 문제를 거론하는 것이다. EPA는 이를 위해 산업체의 화학전문가 훈련과 대학생의 교육을 보조하는 자료 및 교과과정 개발을 위한 다양한 노력을 지원하고 있다. 미시간 대학의 국가오염방지센터, 환경기술교육을 위한 조합, 미국화학협회가 EPA와 함께 그린 화학 교육에 대한 활동을 수행하고 있다.

다. 일본

일본에서 그린화학을 위한 교육 활동의 대표적인 예는 『Dream Chemistry 21』과 시민들을 위한 공공 강좌 등이 있다. 『Dream Chemistry 21』은 학생들을 대상으로 한 운동으로서, 산업체 및 학계에서 7년 동안 합동으로 이 운동을 추진시키고 있다.

한편 시민들을 위한 공공강좌는 환경청에 의한 개방된 심포지엄, 1,000명 이상의 시민들이 참석하는 다이옥신에 대한 심포지엄, 산업체, 학계, 정부 및 비정부기구로부터의 토론회, 지방정부 기관을 위한 심포지엄 등이 있다.

다음페이지 계속