

녹색화학의 원칙과 구현

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이준웅
(dalmaioikr@reseat.re.kr)

1. 서론

- 녹색화학은 위험하거나 환경을 오염시킬 수 있는 물질의 사용과 생성을 최소화하면서 화합물을 제조하는 프로세스를 설계하는 과학이다. 녹색화학의 '12 원칙'이란 화학자들이 지속가능한 목표를 달성하는 데 도움을 줄 수 있는 '설계 규칙'으로서 이 원칙하에 합성반응을 주의 깊게 계획해서 원하지 않는 반응을 최대한 줄일 수 있도록 분자 규모에서 설계하는 것이 특징이다.
- 녹색화학은 분자 규모에서부터 지속가능성을 추구하기 때문에 항공, 자동차, 화장품, 전자, 에너지 및 농업 분야에 기술적으로 우수하고 경제성 있는 기술들이 다수 개발되고 있다. 녹색화학이 이렇게 큰 효과를 낼 수 있는 것은 이 기술이 실험실을 넘어서 산업, 교육, 환경 및 일반 대중들에게 파고들었기 때문이다.

2. 녹색화학의 3대 요소

- 녹색화학은 세 가지 요소에 바탕을 두고 수행된다. 즉, ① 화합물의 전 순환주기를 고려해서 분자의 구조와 합성 프로세스를 설계하고, ② 제품의 내재적인 위험 요소(hazard)가 적은 프로세스를 개발하고, ③ 물리·화학적 원리들을 통합적으로 적용한다.
- 녹색화학 12 원칙은 안전한 화합물과 변환 프로세스를 설계하는 기본 요소이다. 안전을 위한 보호시스템이 실패하면 위험성(risk)이 높아지는데, 위험성은 위험요소(hazard)와 노출의 함수이기 때문에 위험요소가 높고 노출회피 시스템이 실패하면 부상이나 사망과 같은 참사가 일어날 수 있다. 노출회피에만 초점을 맞추는 대신 위험요소를 최소화하면 사고, 누출, 태업 등 원하지 않는 사태가 발생하더라도 위험성은 낮아

진다. 화합물의 전 순환주기에 걸쳐서 위험요소를 감소시킨다는 녹색화학의 목표는 경제적으로도 이익이 된다.

3. 녹색화학의 12 원칙

○ 녹색화학의 12 원칙은 *Yale University*의 P. Anastas 등이 1998년에 소개하였다. 녹색화학 12 원칙은 ① 폐기물 생성 방지, ② 원자 경제, ③ 위험성이 낮은 합성방법의 설계, ④ 더 안전한 화합물의 설계 ⑤ 더 안전한 용매와 보조물질의 사용, ⑥ 에너지 효율이 높은 프로세스의 설계, ⑦ 재생가능 원료의 사용, ⑧ 유도체 생성의 억제, ⑨ 선택성이 우수한 촉매 사용, ⑩ 안전하게 분해되는 화합물의 설계, ⑪ 공해방지를 위한 실시간 분석 및 ⑫ 사고방지를 위한 안전한 화합물의 사용 등으로 나뉜다.

○ 폐기물 생성 방지(prevention)

- 화학 프로세스에서 폐기물이 발생한 후 이를 제거하는 것보다는 이의 발생을 사전에 방지하는 것이 훨씬 낫다. 폐기물이란 화학 프로세스에서 발생하는 가치가 없거나 불필요하게 에너지를 낭비시키는 물질로서 이의 물리적 특성, 독성, 양 및 방출되는 형태에 따라서 환경에 미치는 효과도 다르게 나타난다.

- *Delft University*의 R. Sheldon이 1992년에 소개한 환경영향인자(E-Factor)는 제품 1kg 당 생기는 폐기물의 양으로 해당 프로세스가 환경 측면에서 수용가능한지를 정량적으로 평가하는 수단이다. 클로로히드린(ClCCO)을 거쳐서 산화에틸렌을 합성하는 프로세스의 E-Factor는 5이지만, 합성에 직접 산소분자를 사용하면 염소를 사용할 필요가 없기 때문에 E-Factor는 0.3으로 뚝 떨어진다.

○ 원자 경제(atom economy): *Stanford University*의 B. Trost가 1991년에 소개한 원자 경제란 원료 내 원자가 최종 제품에 최대한 포함되도록 한다는 개념으로서 이상적인 반응은 반응물의 모든 원자들이 최종 생성물에 포함되는 반응이다. 그리냐르반응은 원자 경제적으로 불리한 반응이지만 2002년에 알킬, 알데히드 및 아민 등이 관련된 A3 커플링

을 통해서 propargylic amine을 합성하면 원자경제가 획기적으로 제고된다.

- 유기합성: 유기합성은 지난 10여 년 동안의 발전으로 100여 년 동안 사용되어 오던 많은 반응들이 녹색반응으로 전환되었다. 즉, 고리첨가반응, 재배치 또는 다 성분 결합반응 등은 이미 효과적인 원자경제를 달성할 수 있는 반응으로 정착되고 있고, 연속(cascade) 및 직렬(tandem) 반응, C-H 활성화, 치환(metathesis) 및 효소반응 등도 유기화합물들을 청정한 방법으로 합성할 수 있는 녹색화학으로 등장하고 있다.
- 분자설계: 화학자들이 의약품이나 특정 기능성을 갖는 신소재 물질을 설계하면서 합성 과정의 위험인자들을 염두에 두지 않는다는 점은 놀라운 사실이다. 분자들이 환경에 미치는 영향과 생태계 내에서 일어나는 변환특성을 이해하는 것은 지속가능성이라는 측면에서 매우 중요하기 때문에 이러한 지식을 완벽하게 소화해야만 진정으로 인간과 환경에 더 안전한 분자를 설계할 수 있다고 말할 수 있다.



- 용매
 - 용매는 합성이나 화학 프로세스에서 다량으로 폐기된다는 점에서 녹색화학에서 가장 중요한 과제가 되고 있다. 대부분의 용매들은 독성이 강하고 발연성이 높을 뿐만 아니라 부식성이 있다. 용매의 휘발성과 용해성은 공기, 물 및 토양을 오염시키는 주요인으로 작용해서 작업자들에 위험도를 높여서 심각한 사고로 이어질 가능성을 높인다.
 - 용매 회수에는 에너지가 소요되고 다른 장비들을 오염시킬 수도 있다. 이러한 심각한 문제들을 해결하기 위해서 화학자들은 좀 더 안전한 용매를 찾기 시작했는데 무 용매 시스템, 물, 초임계 유체(SCF)와 함께 최근에는 이온용액 등이 녹색화학을 구현할 수 있는 새로운 해결책으로 등장하고 있다.
- 에너지: 석유자원이 고갈되면서 에너지 효율을 높일 수 있는 프로세스를 개발하고 인류가 생존하는 한 고갈되지 않는 재생가능 에너지를 찾아야만 한다. 화학반응이나 프로세스를 설계할 때 에너지를 과도하게

소비하지 않도록 반응의 에너지 장벽을 낮추거나 적절한 반응 개시 물질들을 선정하여 화학적 변환이 상온에서 일어나게 함으로써 에너지 소요를 줄이는 것도 화학자들의 임무 중 하나가 될 것이다.

- 재생가능 에너지: 재생가능 물질에는 셀룰로오스, 리그닌, 코르크질, 껍질, 키틴질, 전분, 글리세롤 및 오일 등이 포함된다. 종이산업의 폐기물인 리그닌은 주로 태워졌는데, 최근 분산제나 첨가제로 사용되거나 알데히드와 같은 기능기를 갖는 vanillin이나 휴민산(humic acid)과 같은 화합물을 생산하는 원료로 사용될 수 있는 방법이 개발되었다.
- 유도체: *University of Massachusetts*의 L. D. Taylor는 1993년에 공유결합 대신 분자 간 상호작용에 의존하는 새로운 유도체화 개념을 소개하였다. 이 방법은 적은 에너지와 물질을 사용해서 원래 시스템을 화학적으로 변형시키기 위해 개발되었다. 비 공유결합을 이용해서 유도체를 합성한 예로서 폴라로이드 필름에 사용되는 히드로퀴논()의 확산과 용해도를 조절한 경우를 들 수 있다.
- 촉매: 폐기물의 생성은 반응하는 시약의 양과 비례하는데 화학 양론적 반응을 촉매 프로세스로 전환하면 합성효율을 높일 수 있다. 촉매를 사용할 경우, 소요되는 에너지를 낮추고 생성물의 선택성을 높일 수 있기 때문에 반응효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다.
- 생분해성: 화합물이 환경에 오래 남으면 문제를 야기시킨다. 1950년대 계면활성제로 사용되던 TPPS($C_{44}H_{30}N_4O_{12}S_4 \cdot xH_2O$)가 분해되지 않고 하수로 빠져나가면서 식수원을 오염시켜 수돗물을 틀면 거품이 생기는 경우도 있었다. 사태가 심각해지자 산업계는 해결책 모색에 나섰는데 결국 TPPS의 가지형 메틸기 사슬을 선형의 alkylbenzene sulfonate 사슬로 치환하면 생분해가 빠르게 진행된다는 사실을 발견하게 되었다.
- 녹색분석: 녹색분석이란 분석과정에서 적은 양의 폐기물을 생성해서 건강과 환경에 안전한 분석방법으로서 환경에 미치는 영향을 실시간으로 모니터링하는 기능을 포함하고 있다. 실시간으로 모니터링해서 어떤 상황에 신속하게 대처할 수 있는 능력이 있으면 사고 예방, 에너지 절약, 및 부산물의 생성을 줄일 수 있다.

- 사고예방: 1990년 발의된 ‘화학사고 방지 및 청정공기 법안 수정안’에 의하면 사고예방은 위험성을 인식하고 이를 평가하는 데서 출발한다. 화합물 합성 프로세스를 설계할 경우, 인도의 보팔사고나 나이아가라 폭포 인근의 Love Canal 사고와 같은 대형 사고를 방지하기 위해서 독성, 폭발성, 인화성 등과 같은 모든 위험도를 감안해야만 한다.

4. 녹색화학이 달성한 성과

- 미국 정부는 매년 녹색화학에 기여한 기업과 과학자들에게 ‘녹색화학 대통령상’을 수여하고 있는데, Eastman사는 효소를 이용한 에스테르화 반응경로를 개발한 공로로, Dow AgroScience사는 녹색살충제 개발로 2009년과 2008년에 각각 녹색화학 대통령상을 수상하였다.
- 제약회사의 경우 Merck는 2006년에 2형 당뇨병 치료제인 키랄 β 아미노산 유도체 Sitagliptin의 녹색합성경로를 개발한 공로로 녹색화학 대통령상을 수상하였고, Bristol-Myers Squibb는 2004년에 항암치료제 Taxol 내 활성 성분인 Paclitaxel의 새로운 합성경로를 개발하였다.
- Pfizer는 2002년에 항우울증 치료제의 활성 성분인 sertraline의 녹색합성경로를 개발하여 합성효율과 합성의 선택성을 높이고 환경오염도 획기적으로 줄였고 Solutia Inc.는 1998년에 4-aminodiphenylamine 합성과정에서 염소를 제거하는 방법을 개발하는 등 화학 산업체들은 지금까지 녹색화학 발전에 기여한 업적이 실로 대단하다고 평가된다.

5. 해결해야 할 과제들

- 12 원칙의 융합: 녹색화학 12 원칙은 통합적으로 적용해야만 지속가능한 프로세스를 달성할 수 있다. 이 원칙들의 상호 보완책을 찾아냄으로써 지속가능한 설계가 이루어지고 혁신적 변화가 구현될 것이다.
- 다중 기능성 촉매: 대부분의 촉매는 오직 한 가지 반응에만 작용하도록 설계되어 있고 일련의 화학적 변환에 작용하는 다중 기능성 촉매는 거의 알려진 것이 없다. 만일 하나의 촉매 시스템을 다양한 반응에 사용하거나 하나의 반응기에서 전체 합성단계에 작용할 수 있다면 높은 원

료 및 에너지 효율로 복잡한 분자를 합성할 수 있을 것이다.

- 약한 결합력의 이용: 비 공유결합이나 약한 힘의 상호작용이 앞으로 중요한 역할을 할 것이다. 원자나 화학그룹 간의 약한 상호작용을 이용해서 화합물을 합성하는 방법이 개발되면 공유결합의 절단이나 결합에 소요되는 에너지를 줄일 수 있기 때문에 유리하다. 현재 화학적 합성에 주도적 역할을 하는 공유결합 대신 약한 상호작용을 이용하는 기술이 발전하면 분자 규모에서 지속가능한 방법에 도달할 수 있을 것이다.
- 통합적 사고: 과학적 현상은 환원주의적 방법으로 규명하여 통신, 수송, 의학 등 우리에게 문명의 이기를 가져다주었으나 인간과 환경에 예기치 못했던 커다란 피해를 미치는 결과도 초래하였다. 녹색화학은 과학적 현상을 체계적으로 접근함으로써 원하지 않는 결과를 사전에 피하면서 중요한 업적을 쌓아나가고 있다. 환원적 방법을 시스템 차원의 사고와 결합하면 진정으로 혁신적인 변화를 가져올 수 있을 것이다.

6. 결론



- 여러 세대에 걸쳐서 분자 과학자들은 새로운 분자와 소재를 발명하고 이들 물질들을 친사회적이면서 경제적으로 제조할 수 있는 프로세스를 개발하였다. 녹색화학은 화학 분야의 오랜 전통인 창의적 능력을 발휘해서 인류 및 나아가서 지구 환경에 도움이 될 수 있는 방법들을 개발하기 위한 학문으로서 자리 잡고 있다.
- 화학 산업체들은 녹색화학을 바탕으로 창의적인 방법들을 개발함으로써 기업의 이익을 더 많이 창출하는 동시에 환경에도 도움을 줄 수 있다는 사실을 입증하고 있다. 전 세계 녹색화학 분야 과학자들이 이룩한 지금까지의 업적은 앞으로 달성할 수 있는 엄청난 가능성에 비하면 아직 걸음마 단계이다.

출처 : Paul Anastas and Nicolas Eghbali, "Green Chemistry - Principles and Practice", *Chemical Society Reviews*, **39**, 2010, pp.301~312

◁ 전문가 제언 ▷

- 녹색기술은 21세기 과학을 주도할 과학 분야라는 점에서 우리나라를 비롯한 선진국들이 기술경쟁을 치열하게 벌이고 있다. 우리나라는 2008년 8월 15일 대통령의 대한민국 건국 60년 경축사에서 ‘저탄소 녹색성장’을 국가의 새로운 비전의 축으로 제시하였고 이를 바탕으로 2009년 1월 5일 녹색성장위원회가 대통령 직속기관으로 설립해서 온실가스와 환경오염 감축기술을 강력하게 추진하고 있다.
- 녹색화학은 1990년대 초 미국 Yale University의 P. Anastas 등이 이의 중요성을 전파하기 시작해서 1998년에는 소위 ‘녹색화학 12 원칙’을 발표해서 녹색화학이 지향해야할 방향을 제시하는 등 녹색화학 분야를 선도하고 있다.
- 이 글은 P. Anastas가 녹색화학의 개념, 12원칙, 이의 구현, 및 미래 전망 등을 역사적 조명과 함께 최근 연구 동향을 소개한 리뷰 논문을 필자가 간략하게 요약한 글이다. 원문 내에는 12개 원칙에 해당되는 녹색화학 구현 사례들을 자세하게 소개하였으나, 본 분석물의 지면이 제약된 관계로 자세한 화학적 반응들을 소개할 수 없었다는 점에 아쉬움을 느꼈다. 따라서 녹색화학을 구현한 자세한 예를 알고자 하는 이들은 본문을 참고하기 바란다.
- 우리나라는 정부차원에서 녹색성장을 국가의 미래 비전으로 제시해서 이를 강력하게 지원하려는 의지와는 상반되고 실제 연구 활동은 아직 극히 미미한 수준으로서, 예를 들면 지난 10여 년 동안 발표된 녹색화학 제목의 논문 1,000여 편 중에 우리나라 기관에서 발표한 논문은 불과 5편 정도에 불과한 실정이다. 그러나 정부가 정한 녹색성장 27대 집중 육성 기술 분야에 연구가 진행된다면 앞으로 이 분야 연구 활동과 수준도 아울러 향상되리라고 기대해 본다.