

이온성 액체의 잠재 위험 평가

인하대학교 초정밀생물분리기술연구소

하 성호, 이 상현, 구 윤모

1. 서론

이온성 액체는 “Green” Chemistry의 시발 물질로서 현재 폭발적인 관심을 끌고 있다. 이온성 액체는 증기압이 무시해도 좋을 만큼 낮기 때문에 유해한 휘발성 유기화합물을 배출하지 않는다. 또한, 양이온과 음이온의 결합을 쉽게 조절하여 합성할 수 있어서 다양한 새로운 화학 반응의 용매가 될 수 있다. 그러나, 이러한 장점에도 불구하고 세포 독성 실험과 그 외의 환경적 영향은 여전히 추구되어야 한다. 비록 이온성 액체가 안정된 “Green” 용매로 간주되고 있으나, 생화학적 분해성과 독성에 관한 연구는 그다지 많은 진전이 되지 못하고 있다. 본 리뷰를 통해 이온성 액체의 화학적 구조가 독성에 어떻게 영향을 미치는 지, 그리고 친생태학적(eco-friendly) 이온성 액체의 설계에 관해 토의하고자 한다.

2. 새로운 화학 제품의 지속 가능한 설계의 모델로서의 이온성 액체

Seddon, Wasserscheid 그리고 Welton 등 여러 과학자들이 지적하는 바와 같이 이온성 액체는 화학과 화학공업의 여러 분야에서 현존하는 공정의 개선 및 새로운 공정의 개발 잠재성을 가지고 있다. 화학적 합성, 촉매, 추출, 전기화학 등과 같은 여러 분야에서의 장점 이외에도 이온성 액체는 증기압이 매우 낮아 순수하고 안정하며 휘발성 유기물질을 배출하지 않는다는 전통적인 휘발성 유기 용매가 가지지 못한 매우 중요한 장점이 있다. 그러므로 공정의 기술적 안정성과 종업원의 건강이 크게 향상될 수 있다.

그렇다면, 이온성 액체는 이미 “green”이고 “지속 가능한” 화학제품인가? 이온성 액체의 잠재적 위험을 평가하고 지속 가능한 제품을 설계하는 전략으로 다음과 같은 방법들이 제시된다. 첫째 학제간의 이론 및 역할 분담을 통한 실험적 협력, 둘째 “실험 도구 개념(testkit concept)”에 따른 선도적 화학품의 선정, 셋째 여러 수준의 복잡성을 가진 독성 실험, 넷째 조직적 알고리즘을 통한 화학품의 잠재적인 분자 상호작용, 모양, 구조상의 유연성 그리고 화학적, 생물학적 반응성의 평가, 다섯째 양적 및 질적 구조-활성 관계의 평가, 여섯째 대사 반응으로 인한 전환 가능한 생성물의 이론적 평가, 일곱째 다차원적인 위험 분석(배출, 시공간적 범위, 생체내 축적, 생물학적 활성 그리고 불확실성)이다. 그러나, 이러한 목적들은 이상적이어서 목적들 간의 충돌과 모순이 종종 발생할 수 있다. 그러므로 사고와 행동의 주 패러다임의 변화를 수용 가능한 타협에서 구해야 한다.

3. 생물학적 분해성

이온성 액체의 환경적으로 깨끗함은 많이 강조되었으나 그 생물학적 분해성과 환경에 축적 잠재성 연구는 이제 시작단계이다. 높은 열적 및 화학적 안정성 같은 이온성 액체의 공업적 매력은 동시에 환경에 잔존 잠재성에 우려를 갖게 한다. 일반적으로 사용되는 1-butyl-3-methylimidazolium 계열의 이온성 액체의 생물학적 분해성을 최근에 조사하였다. 이들 이온성 액체는 실험 대상 화합물 중 하나를 빼고 28일 동안 거의 분해되지 않아 대단히 분해성이 불량하다는 것이 밝혀졌다.

이온성 액체와 계면활성제가 구조적으로 비슷하다는 점에서 생물학적 분해 가능 계면활성제에 대한 연구결과를 여기에 이용할 수 있다. 가지를 친 알킬 사슬을 선형 알킬 그룹으로 대체함으로써 생물학적 분해성을 크게 개선할 수 있다. 수산화기, 알데하이드나 카르복실기 같이 산소가 들어있는 기는 생물학적 분해를 촉진시킨다.

4. 이온성 액체 하부구조의 생물학적 영향

이온성 액체의 구조상의 변화가 미치는 생태학적 영향을 이해하기 위해 다음과 같은 질문을 해야 한다: 1) 음이온과 머리그룹이 일정한 상태에서 측면 사슬 R1, R2 등이 길어지면 생물학적 활성에 어떤 영향을 미치나? 2) 음이온의 교환이 생물학적 활성에 영향을 미치나? 3) 어떤 종류의 머리그룹이 생물학적 활성에 영향을 미치나? 4) 대사작용을 통해 이온성 액체의 독성 제거가 가능한가?

4.1 측면 사슬 길이의 영향

2003년 imidazolium 양이온 부분의 R1 또는 R2의 길이의 증가가 해양 박테리아와 다 타입의 포유류 세포 배양액에서 세포독성에 미치는 영향을 조직적으로 검사한 논문이 발표되었다. 그 후에도 여러 양이온과 음이온의 조합에서 “측면 사슬 길이의 영향”을 검사하였는데, 측면 사슬이 짧을수록 세포독성이 낮아진다는 것이 분명히 밝혀졌다.

4.2 음이온의 영향

음이온을 이용하여 이온성 액체의 물리적, 화학적 및 기술적 성질을 조정하기 위해서는 음이온의 구조와 이의 생물학적 영향과의 관계가 우선 이해하여야 한다. 최근의 연구결과에 의하면 양이온의 구조는 일정하게 유지하며 음이온만 변화하는 이온성 액체를 선정하여 세포의 활성을 측정하였을 때 음이온이 세포독성에 영향을 미친다는 것이 밝혀졌다.

4.3 양이온 머리그룹의 영향

이온성 액체에서 양전하를 가진 “머리그룹”은 여러 화학적 구조를 형성하고 있다. 이 머리그룹의 화학적 성질이 생물학적 활성에 영향을 미치는 것이 분명하나 그 영향은 서로 다르며, 어떤 경우에는 미약한 영향이 주는 것으로 관찰되기도 한다.

5. 친생태학적 이온성 액체의 설계

현재 적용되고 있는 “green” 이온성 액체의 설계 과정은 다음과 같다: 일련의 이온성 액체의 합성, 이들의 생분해성과 생태학적 독성 실험, 환경적으로 무해한 성격을 가진 이온성 액체의 선정과 계속하여 그들의 기술적 용도의 결정이다.

한 제품의 지속 가능성을 개선하려면 이 제품의 인간, 환경과 경제적 이윤에 미치는 영향을 최적화 하여야 한다. 이 영향에는 위에서 언급한 생태학적 독성의 위험과 그 제품의 전 생명주기(life cycle) 동안의 자원의 고갈도 포함된다. 화합물의 사용 및 재사용과 재순환 방법에 따라 누출과 폐기물 처리과정에서 물질의 손실이 발생한다. 이러한 손실과 재생에 필요한 에너지가 생명주기 목록 (life cycle inventory)을 결정한다. 환경적 카테고리에서 고려하여 얻은 결과는 종종 목적과 상충된다. 경제적 목적을 고려의 대상에 포함시키면 이 상충이 더 악화된다. 다수 목적의 최적화 문제를 수학적으로 표현할 수 있다면, 환경-경제의 취사선택을 통해 이러한 문제점들을 해결할 수 있다.

잠재적 위험은 화합물의 독성 하나만으로 결정되는 것이 아니고, 환경적 적정성의 세가지 문제들, 즉 생산과 폐기물의 흐름, 생산중의 유출, 용도와 재순환에 의해 결정된다. 응용-특정화된 잠재적 위험을 고려하기 위해서는 생태학적 알고리즘이 포함되어야 하며, 이를 통해 특정 응용을 위한 새로운 구조적 요소나 화합물질의 생태학적 독성 잠재성이 물질수지를 기반으로 평가된다.

마지막으로, 이온성 액체가 응용 시험을 통과하면, 화합물질이 사용 후, 재생이나 액-액 추출 또는 나노 여과 등과 같은 방법으로 회수될 수 있는 지를 조사한다. 만약 그렇다면, 그 화합물은 “green”제품으로 간주된다.

6. 결론

더 많은 위험 평가 연구를 위해서는, 더 많은 환경 독성 결과뿐만 아니라 노출 경로,생전환, 물질의 결합상태, 그리고 생체내 축적에 대한 많은 연구가 필요하며, 이와는

별개로, 이온성 액체의 전체 생명주기를 고려한 적절한 재생 혹은 재사용 방법에 관한 연구가 더 많이 필요하다. 결과에 대한 활발한 토의와 본문에서 고려한 요소들의 적절한 조합을 통해 이 환상적인 화합물인 이온성 액체의 진정한 지속가능한 개발의 기회가 제공될 것이다.

References

1. B. Jastorff, et al., *Green Chem.*, 7, 362-372 (2005).
2. B. Jastorff, et al., *Green Chem.*, 5, 136-142 (2003).