

CWC

2024 vol.34

NEWS



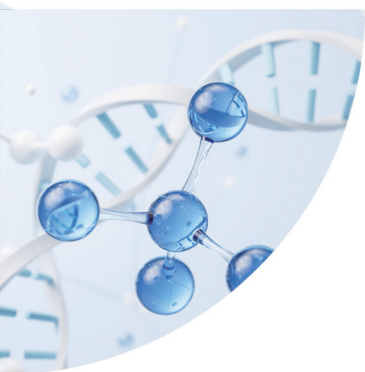
한국화학산업협회

화학무기 수출입 불일치
주요 원인 분석 및 대응 방안



정근홍 / 육군사관학교

AI 시대의 화학무기 통제 :
새로운 도전과 기회



PART 01 한국화학산업협회

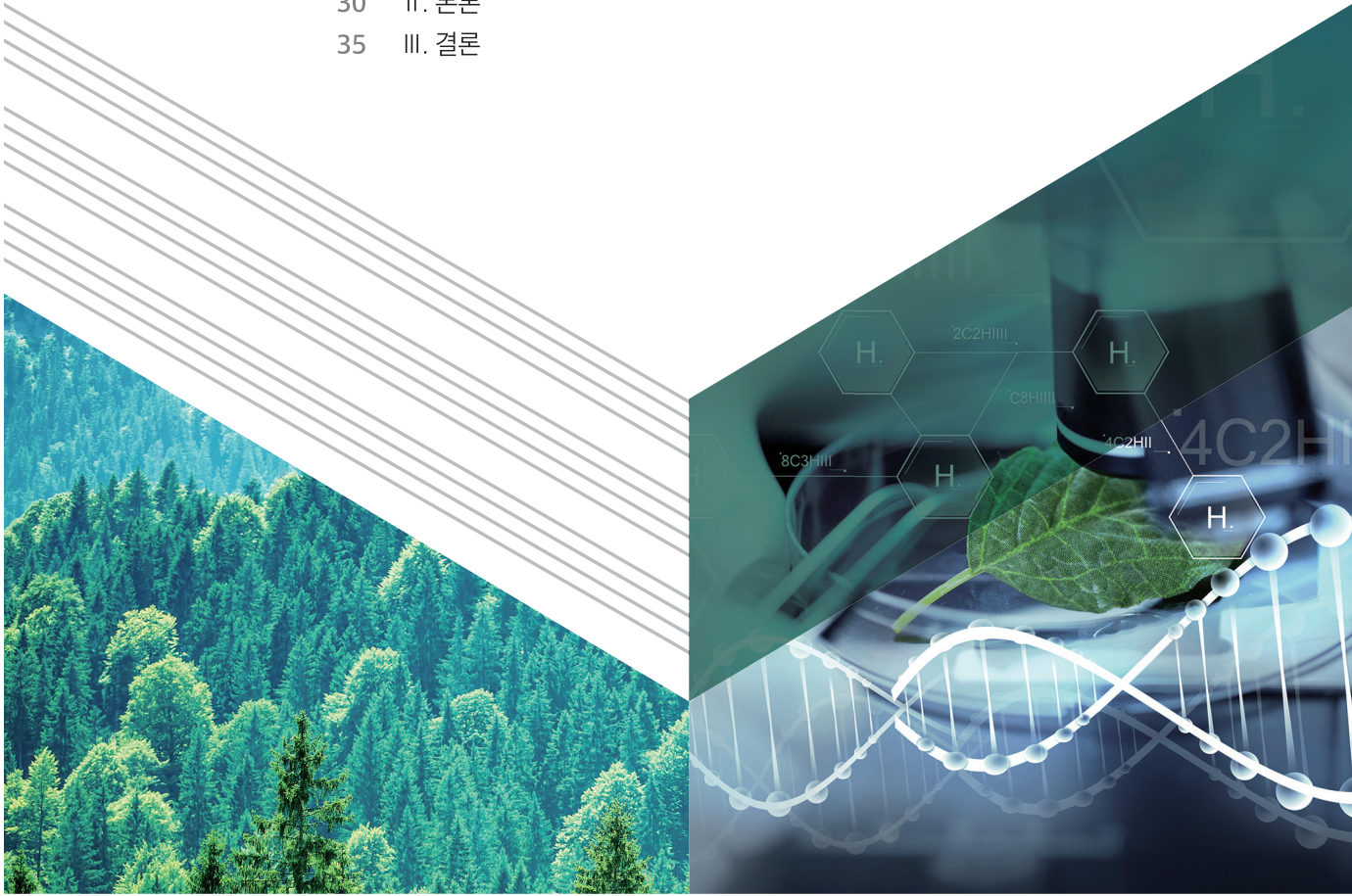
화학무기 수출입 불일치 주요 원인 분석 및 대응 방안

- 06 I. 서론
- 10 II. 본론
- 24 III. 결론

PART 02 정근홍 / 육군사관학교

AI 시대의 화학무기 통제 : 새로운 도전과 기회

- 28 I. 서론
- 30 II. 본론
- 35 III. 결론





PART

01

한국화학산업협회

화학무기 수출입 불일치 주요 원인
분석 및 대응 방안

- I. 서론
- II. 본론
- III. 결론





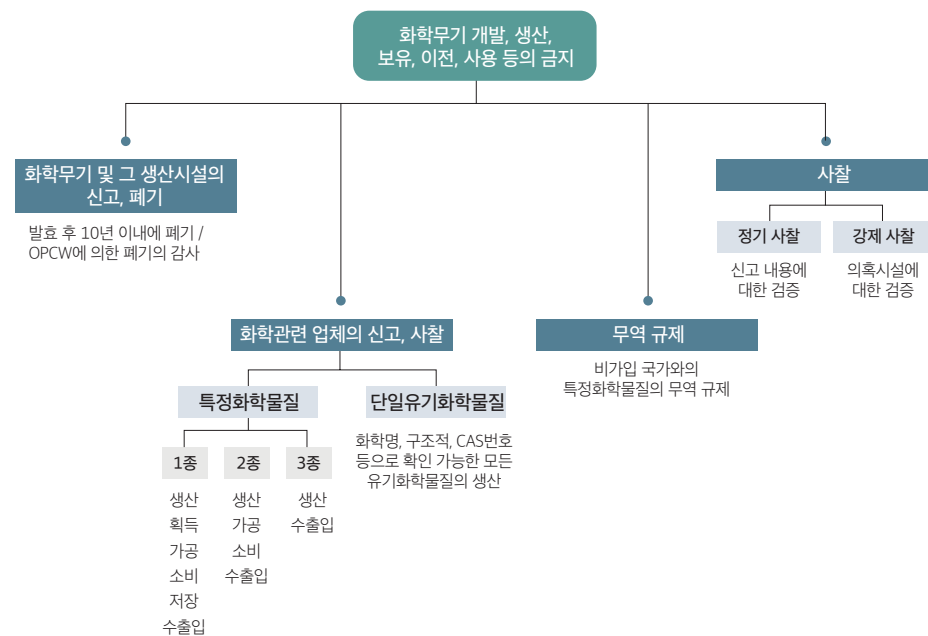
한국화학산업협회

화학무기 수출입불일치 주요 원인 분석 및 대응 방안

I 서론

화학무기의 개발·생산·비축·사용금지 및 폐기에 관한 협약(Convention on the Prohibition of the Development Production Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on Their Destruction)은 화학물질의 개발, 생산, 비축, 사용 및 이전을 금지하는 국제조약이다. 화학무기금지기구는(이하 'OPCW') 네덜란드 헤이그 소재한 국제기구로서, 화학무기 금지 및 확산 방지를 목적으로 화학무기 금지협약에 따라 1997년 설립되었다. 협약가입 당사국은 협약 6조에(신고와 사찰) 따라 대상 화학물질의 제조, 가공, 수출입 등을 신고해야 하며, 신고 업체는 사찰 대상 기준에 따라 화학무기금지기구로부터 사찰을 직접 받아야 한다.

<화학무기금지협약 구조>



한국은 화학무기금지협약 가입국으로서(97.4) 협약 규정 물질 및 시설 신고와 국제사찰 대응 등의 의무를 원활히 이행해야 한다. 정부는 협약가입에 앞서 이행 필요 사항 규정을 위해 「화학무기의 금지」를 위한 특정화학물질의 제조·수출입 규제 등에 관한 법률」을 제정(96.8)하였다. 이후 생물무기금지협약 시행의 법적 근거 마련을 위해 개정(06.4)되었고, 「화학무기·생물무기의 금지와 특정화학물질·생물작용제 등의 제조·수출입 규제 등에 관한 법률」(이하 '생화학무기법')이 최종 제정되었다.

동법에는 정부 주요 부처의 역할과 임무가 구체적으로 규정되어 있다. 외교부는 제4조(국제기구와의 협력 등)에 따라 정부를 대표하여 화학무기금지기구(OPCW)와 다른 협약당사국과의 협력 및 교섭 업무를 담당한다. 산업통상자원부는 특정화학물질의 제조 및 수출 허가를 비롯하여 제조·가공·소비 신고(계획 및 실적) 주무 관청이다. 산업통상자원부는 시행규칙 제10조(업무의 위탁기관)에 따라 한국화학산업협회에 특정화학물질의 제조량 등 신고 접수에 관한 업무를 위탁(23.1.1)하였다. 이에 한국화학산업협회는 산업계 활동신고 및 국제산업사찰 등을 지원하고, 인식 제고 및 부정적 영향 최소화를 위한 업체 교육 및 관련 정보자료를 제공한다.

<국내 담당기관 이행 체계>



화학무기 최초신고는 협약이 당사국에 대해 발효한 후 30일 이내에 행하여지고 각국에 1회에 한정하며, 전년도 실적신고는 최초신고를 한 다음해부터 매년, 해당연도 종료 후 90일 이내에 모든 사업장의 전년도 활동에 대해 한다. 다음 연도 계획신고는 최초신고를 행한 해부터 매년, 다음 연도 시작 60일 이전에 2종 및 3종 화학물질 생산시설의 다음연도 활동에 대해 해야되나 신고되지 않은 새로운 활동을 할 경우, 활동 개시 5일전에 OPCW에 통고해야 한다.

협약에서 정한 신고대상 화학물질은 화학무기 제조에 직접 사용되거나 사용 가능성이 있는 독성화학물질과 독성화학물질의 합성원료로 사용되는 원료물질(전구체)로 크게 나뉜다. 총 43개 화학물질군으로 이루어진 특정화학물질은 그 위험도에 따라 1종, 2종, 3종 화학물질로 분류되어 '화학물질에 관한 부속서'에 열거되어 있으며, 동 부속서 제9부에서는 특정화학물질 외에 개별 유기화학물질, 즉 단일유기화학물질의 합성 생산시설의 신고를 별도로 규정하고 있다. 국내 생화학무기법 시행령 별표3에 신고대상 화학물질별 활동, 농도, 수량, 신고 내용, 신고 기간을 세부적으로 규정하고 있다.



한국화학산업협회

- *1종 : 화학무기로 개발·생산·비축·사용되었던 물질로서 상업적으로 거의 또는 전혀 용도가 없는 화학물질
- *2종 : 화학무기로 사용될 수 있는 물질로서 상업적으로 대량 생산되지 아니하는 화학물질
- *3종 : 화학무기로 사용될 수 있는 물질로서 상업적으로 대량 생산될 수 있는 화학물질
- *단일유기화학물질 : 화학명·구조식 및 화학 색인정보 등록번호 등으로 확인될 수 있는 탄소 화합물로 이루어진 모든 화학합성물(탄화수소, 고분자중합체, 화약류 제외)

협약당사국은 화학무기금지협약 비가입 당사국과의 수출입을 제한하거나 방지하는 다양한 수출입 제한 규제를 한다. 1종 화학물질은 비협약 당사국과 수출입이 전면 금지된다. 2종 화학물질은 독성 화학물질 및 원료물질로 분류에 따라 독성화학물질은 농도1%이하, 원료물질은 10%이하 및 개인 사용 판매 목적으로 포장된 소비제품은 수출입 금지에서 제외된다. 3종화학물질은 수출입이 금지되지는 않으나 최종 사용자동의서 제출 시 수출입이 가능하다. 다만 3종 화학물질의 농도가 10%이하 이거나 개인 사용을 위한 판매 목적의 소비제품은 수출입 금지에서 제외된다.

신고 대상(수량 및 농도 고려) 특정화학물질별 신고 방법과 내용 기준은 다르다. 1종 화학물질의 경우 개별 수출입 건마다 신고해야 한다. 2종 및 3종 화학물질의 수출입 및 단일유기화학물질 제조 물량은 정기 실적신고를(~2.15) 통해 신고 되어야 한다. 즉 계획 신고 시에는 제외된다.

화학물질별 신고 대상 등(제9조 관련)

신고 대상 물질		활동	농도	신고 대상 수량	신고 내용	신고기간
1종 화학물질					○ 제조·가공 및 소비: 전년도 실적 및 다음 해 계획 ○ 수출입: 전년도 실적	○ 실적: 매년 2월 15일까지 ○ 계획: 매년 9월 15일까지
2종 화학물질	BZ	제조·가공 및 소비	1% 초과 10% 이하	10킬로그램 이상		
			10% 초과	1킬로그램 이상		
		수출입	1% 초과	100그램 이상		
	아미톤·PFIB	제조·가공 및 소비	1% 초과 10% 이하	1톤 이상		
			10% 초과	100킬로그램 이상		
		수출입	1% 초과	10킬로그램 이상		
원료물질	제조·가공 및 소비	30% 초과	1톤 이상			
		수출입	30% 초과	100킬로그램 이상		
3종 화학물질		제조	30% 초과	30톤 이상	○ 제조: 전년도 실적 및 다음 해 계획 ○ 수출입: 전년도 실적	
		수출입	30% 초과	3톤 이상		
단일유기 화학물질	인·황 또는 불소를 함유한 유기화학물질	제조		30톤 이상	○ 제조: 전년도 실적	
	그 밖의 유기화학물질	제조		200톤 이상		



한국화학산업협회

II 본론

특정화학물질 수출입 모니터링은 화학무기금지협약에 따라 금지되지 않은 목적에 부합되는 화학물질의 거래 확보 차원에서 매우 중요하다. 그래서 거래되는 모든 화학무기 관련 물질은 기본적으로 당국에 보고되어야 한다. 화학무기금지기구는 수출입 불일치가 협약 이행에 위험을 초래할 가능성이 매우 크다고 판단하고 있다.

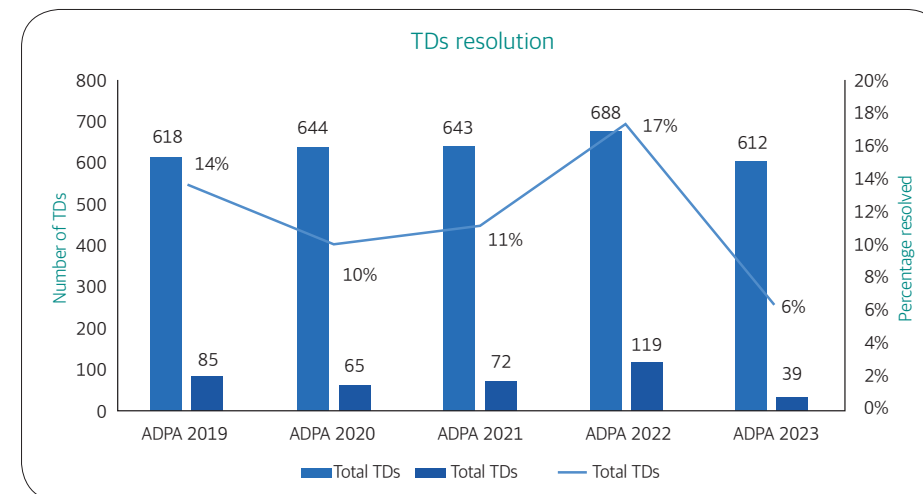
국별 화학무기 담당기관은(National Authorities) 특정화학물질의 신고 수출입 관련 업무 연관성이 크기 때문에, 무엇보다 협력을 통한 수출입 불일치 해결이 강조되고 있다. 최근 화학무기금지기구에 서 주최한 국가 담당자 회의에서(Meeting of National Authorities of States Parties) 수출입불일치를 집중적으로 논의하고 있다. 관련 시범 워크숍 개최를 통해 국별 화학무기 담당기관의 수출입불일치 해결을 위한 역량 제고를 꾀하는 동시에, 국가 담당자 회기간 개별 담당기관 간 양자 수출입 불일치 간담회 참여를 적극 장려함으로써 자발적인 해결에 역점을 두고 있다. 이에 화학무기금지기구에 서 최근 중요하게 다루고 있게 다루고 있는 수출입불일치(이하 'TD') 원인을 알아보고 해결 방안 등을 살펴보고자 한다.

수출입 불일치는 화학무기금지협약 당사국(National Authority) 간 수출국과 수입국의 화학물질 수출입 신고량 차이가 존재하는 경우로 정의한다.

수출 당사국	수입 당사국
화학물질 A 수출 물량	화학물질 A 수입물량

국별 당사국에서 화학무기신고대상 물질의 공식적인 수출입 데이터검사 및 검증 절차가 따로 있지 않다. 수출입 데이터 및 불일치는 연간 실적신고에서도 특히 2종 및 3종 화학물질에서 주로 발생한 것으로 나타났다. 2023년 화학무기 실적 신고 통계에 따르면 612건의(약 75%비중) 수출입불일치가 확인되었고, 화학무기금지기구에서는 106건의 수출입불일치 Notes Verbal을(수출입불일치 현황 보고서) 발행하였다. 그중에서 14건에 대해 당사국으로부터 회신을 받았고, 이를 통해 2023년 화학무기 실적 신고 기준으로 약 6% 수출입불일치를 해결하였다.

<수출입불일치 추세(2019~2023)>



다음으로 수출입 불일치가 발생하는 주요 원인에 대해 살펴보고자 한다.

첫 번째는 특정화학물질 신고 초안 작성의 오류(Drafting error)이다. 주요 오류 사례로는 단순 오타(Typing)를 비롯하여 물량 단위(예: T→kg)나 천단위 표시 기호, 무게/부피 착오 등이 있다. 이러한 오류는 특정화학물질 신고 개별 업체 혹은 이를 취합하는 국별 담당 기관에서 발생할 수 있다. 오기재를 줄일 방법으로는 신고 담당기관에서 최종 신고 전 업체의 과거 실적과의 비교를 통한 검증 및 확인을 통한 면밀한 검토가 필요하다. 하지만, 근본적이고 완벽한 오류 방지는 현실적으로 어렵기 때문에 예방 차원의 대응이 더 중요할 것으로 사료된다.

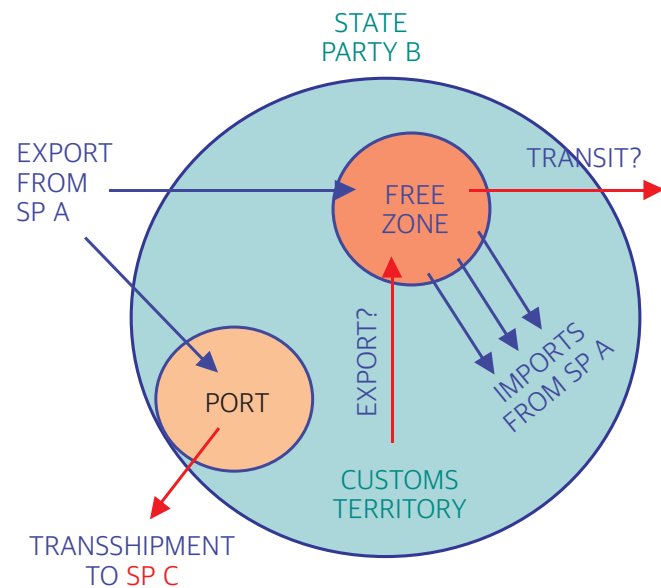
두 번째는 신고대상 특정화학물질의 수량으로 인한 오류이다. 혼합물 형태의 화학무기신고 대상의 경우 물질의 농도를 고려해야 한다. 이밖에 국별 신고대상 특정화학물질의 저농도(National concentration) 기준 및 저중량 임계값의(low-weight thresholds) 차이로 인한 원인으로 수출입 불일치가 발생할 수 있다.

세 번째는 특정화학물질 신고대상 기업 신고 누락으로 인한 경우이다. 즉 화학무기 신고 업체가 국별 담당 기관에 연간 실적신고를 하지 않으면, 국별 담당기관은 화학무기금지기구에 이를 누락 신고하게 되어 수출입 불일치가 발생할 수 있다. 또한, 특정화학물질을 연말에 수출할 경우(수출국) 차년도에 입항(수입국)되어 연도별 수출입 물량 차이가 발생할 수 있다.



네 번째 화학물질 CAS번호(10025-87-3 vs 10025-67-9), 화학물질명(Diethyl Phoshite vs Dimethyl Phoshite), HS코드, 상품명을 착오로 수출입불일치가 발생할 수 있다. 관련하여 OPCW에서는 화학물질 확인을 위한 툴을(화학물질핸드북, 온라인 화학무기 대상물질 데이터베이스, 주요 교육 화학무기대상물질 브로슈어) 제공함으로써 이를 방지하기 위한 다양한 자료 및 정보를 제공하고 있다.

다섯 번째 수출입 국가 오류 및 착오가 원인이 될수 있다. 합의된 수출, 수입, 경유에 대한 정의는 국별 세관에 따라 다를 수 있으나, 화학무기 신고는 크게 문제 되지 않는다. 화학무기금지협약에 따르면 수입 신고의 목적상, 신고 당사국은 화학무기 신고대상 물질이 운송된 국가를 명시해야 한다. 수출 신고 목적으로 화학무기 신고 대상물질이 생산된 국가에 관계없이 신고 당사국은 운송된 국가를 제외하고 예정 목적지 국가를 명시해야 한다. '경유 활동'은 화학무기 신고대상 물질이 목적지로 가는 동안 한 국가의 영토를 통과하는 물리적 움직임을 의미한다. 경유 활동에는 해당 목적으로 임시 보관을 포함한 운송 수단의 변경이 포함된다.



다음으로 수출입 불일치 검증 및 해결 절차를 간단히 살펴보자. 국가 담당기관에서 화학무기금지기구에 실적신고를 제출한다. OPCW 사무국은 이를 내부 검증 후 TD Note Verbale 형태로 국별 당사국에 수출입 불일치를 안내한다. 그러면 국별 담당기관은 수출입 데이터 확인 및 분석을 하고, 관련 이해당사자와의 소통을 통하여 교차 검증한다.

마지막으로 국별 담당기관에서 다른 외부 당국과 수출입 불일치를 해결한다. 이렇게 함으로써 화학무기 신고대상을 추가 발굴할 수 있으며, 궁극적으로는 글로벌 화학물질 교역의 개선 및 효과적 통제가 가능하게 하는 긍정적 효과를 기대할 수 있다.

OPCW 기술사무국에서는 크게 확인(Identification), 소통(Communication), 지원/도구, 촉진(Facilitation) 차원에서 역할을 담당한다. OPCW 기술사무국은 매년 6~7월 화학무기 전년도 실적보고 접수 및 검토 후 국별 담당기관에 수출입불일치 Notes Verbales를(과거 3년) 제공한다. 해당 수출입 불일치 보고서는 수출입불일치 고유 Key가 부여되며, 담당기관으로 하여금 수출입불일치의 원인을 파악하고 자발적인 해결을 권고하고 있다.

OPCW 기술사무국에서는 TD 작성양식 및 가이드라인을 2019년 개발하고, 2023년에는 개정판을 제공하였다. 이는 국별 담당기관에서 수출입불일치에 대한 원인을 규명하고 시스템적인 측면에서 해결방안을 지원하는데 의미가 있다. 지원 도구로서 신고 핸드북(섹션 B 부록C)을 발행되었고, 수출입불일치 해결 일반 가이드가 포함되어 있으며 주기적으로 갱신되고 있다. 여기에 최근 캐나다 정부의 지원으로 Stimson Center에서는 Match 프로젝트를 2021년부터 수행해 오고 있다.



<※ 수출입불일치 담당기관 그룹토의 주요내용>

국가 담당기관은 지난 카타르 도하에서 개최된 제11차 당사국 담당기관 및 화학산업 대표 회의 그룹토의를 통해 수출입 불일치 해결을 위한 의견을 교환하고 뜻을 모았다.

수출입불일치는 향후 일회성보다는 반복 및 연속적인 점검을 하되, 우선순위를 두고 수출입 신고를 하지 않은 국가가 아닌 신고에 허점이 있는 국가 위주의 관리가 필요하다. 이는 개별 담당기관의 가용 자원(시간, 자금, 인력)이 제한적이기 때문에, 수출입 불일치 해결 능력에 영향을 미치기 때문이다. 일부 자유무역지대 국가는 수출입자의 통관 데이터 제출 의무가 부재하여 세관 데이터를 사용할 수 없으므로 수출입불일치 해결이 어렵다는 애로사항을 공유하였다. 이에 수출입 데이터의 제공은 이를 해결하는 데 커다란 도움이 된다. 한편 기업들은 잦은 법규정 개정으로 화학무기 신고 요건 이행에 어려움을 겪고, 일부 국가 담당기관은 OPCW Note verbale 분류가 수출입불일치해결을 더 어렵게 만드는 경우에 대한 애로사항을 공유하였다.

지역 간 표준화가 부족하면 여러 관할권(지역)에서 운영되는 업체의 화학무기 신고가 복잡해질 수 있다는 우려도 있었다. 각 국가 기관별로 사용 및 활용 가능 도구가 다른 부분도 있었다. 일부는 세관 신고 또는 수출/수입 허가 신청을 통해 데이터 접근이 가능하고, 일부는 업체에 정보를 직접 요청하는 경우도 있다.

화학무기 업무 수행에 있어서 화학산업 규모가 큰 당사국의(예, 중국) 경우 업체 현장방문 및 국가 사찰을 수행 지역 기관과 협력이 돈독한 점이 특징이다. 국가 담당기관별로 화학무기신고 담당자가 1명 지정되고 나머지는 팀단위로 수행하거나, 화학무기 이행 국내법에 따라 여러 정부 부처 합동으로 구성된다.

일부 당사국은 정기적인 모의 사찰을 하지 않는데 이를 수행할 권리 유무에 따라 국가별로 차이가 있기 때문이다. 정보 공유를 위해 정기 회의를 개최 및 구성, 화학산업/무역 회의 참석, 화학무기 신고를 위한 업체 방문, 관련 법률 개정 시 정보 공유, 정기 방문/검사를 실시(정보 공유, OPCW 사찰 준비)하고 있다.

화학무기신고에 있어서 일부 당사국은 업체에 직접 연락하여 불분명한 데이터에 대한 정보 요청을 하거나, 필요시 신고 수정기간을 부여한 경우도 있다. 화학무기 신고 마감일이 다가오면 워크숍을 개최, 일부는 업체에 여러 번 알림을 보낸다.

마지막으로 국가 당국은 OPCW Note Verbale은 TD에 대한 접근과 논의를 쉽게 하려면 관련 문서 보안 수준을 낮출 필요가 있다는데 공통적인 의견이 있었다.



한국화학산업협회

앞서 수출입 불일치가 발생하는 주요 원인에 대해 살펴보았다. 그 주요 원인 중에 세 번째인 특정화학물질 신고대상 신고 누락의 경우가 수출입불일치에 가장 커다란 영향을 미친다. 국내 생화학무기법 제28조(벌칙) 제5항에 따르면 제13조 또는 제13조의2에 따른 신고를 하지 아니하거나 거짓으로 신고한 자에 해당하면 2년 이하의 징역 또는 2천만원 이하의 벌금에 처한다. 또한 이로 인한 수출입불일치로 인하여 대외적으로 화학무기금지협약상 국내 담당기관 신뢰하락 등 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이에 한국화학산업협회에서는 수출입불일치 방지를 위해 여러 이해관계자의 협력 및 협조를 통해 특정화학물질 신고대상임에도 신고를 하지 않는 국내 업체를 찾기 위한 노력을 하고 있다. 후속으로 해당 기업을 대상으로 화학무기 신고 교육을 진행한다.

특정화학물질 미신고 업체를 찾기 위해 한국화학산업협회는 화학무기금지기구, 산업통상자원부, 관세청 등으로부터 협조를 통해 관련 특정화학물질 관련 자료를 제공받는다. 기본적으로 수출입불일치 해결을 위한 맞춤형 정보는 따로 없으므로, 다양한 기관에서 제공되는 정보를 바탕으로 미신고 업체를 찾아내야만 하는 실정이다. 이렇게 제공된 정보를 모두 활용한다고 하더라도, 미신고 업체 전체를 찾아내기 위한 정보가 충분하지 않아 현실적인 한계는 있다. 그러면 제공 정보를 어떻게 활용하여 화학무기 미신고 업체를 찾는지 살펴보려고 한다.

우리 협회는 화학무기금지기구에서 제공되는 수출입불일치 Note Verbal 보고서를 통해 최근 2개년도의('21, '22) 화학물질별(Cas No. 기준) 상대국과의 수출입 물량 정보를 확보했다. 우선 수출입불일치의 다양한 원인을 파악하고, 과거 실적 신고 등의 비교를 통해 내부 검토한다. 만약 신고 초안 작성 등의 오류사항이 없고 상대국대비 한국 측 화학물질의 수출 및 수입 물량이 적을 경우 미신고로 인한 수출입 가능성이 있다고 판단한다. 여기서 정확한 수출입 물량 확인을 위해 Note Verbale에서 제공되는 Cas No.를 토대로 OPCW 화학물질 핸드북(※화학무기신고 대상물질) 내 HS코드를 확인한다. 해당 HS코드로 국내 관세법령정보포털을 통해 검색하여 제품 명칭 등 정보를 추가 확인한다.

참고로 HS코드는 전세계적으로 앞 6자리가 공통이며, 국별로 8자리 혹은 10자리 등 차이가 있다. 다만, 제공된 정보는 수출입 활동에 한정되고 기업 목록과 업체별 물량 정보가 없기 때문에 추가 확인이 필요하다. 앞서 설명한 바와 같이 화학무기금지협약 및 생화학무기법에 따른 화학물질별 신고대상 여부 확인을 위해 ❶화학물질 및 활동 ❷물질 수량 ❸업체 정보 등의 최소한의 기본정보가 필요하다.

<OPCW Handbook on Chemicals 2024>

Chemical Name	Phosphorus trichloride	
Key	7719-12-2	
CAS RN	7719-12-2	
Molecular Formula	Cl3P	
HS Code	2812.13	
Schedule	3B06	
IUPAC Name	Phosphorus trichloride	
CAS Index Name	Phosphorus trichloride	
Synonyms	Phosphine, trichloro- Phosphorous chloride Phosphorus chloride (Cl3P2) Phosphorus chloride (PCl3) Trichlorophosphine UN1809	

<관세법령정보포털>

국가		 한국	해당년도	2024년	
품목번호		2812.13-0000	단위(중량/수량)	KG /	단위표기
품명	국문	포스포러스 트리클로라이드			
	영문	Phosphorus trichloride			
간이정액환급					
감면					
원산지					

<무역협회 무역통계(국별 수출입)>

총괄

국가별

▶ 품목 HSK

▶ 2812130000

▶ 선택한 포스포러스 트리클로라이드

▶ 수지교역 수지

▶ 조회

▶ 년월 2022

▶ 12

▶ 회원선택 중량

▶ 당월/누계 누계

▶ 단위 Kg, %

▶ 정렬기준 국가명

☐ 오름차순

☒ 내림차순

▶ 한/영 한글

▶ 전체 : 6 건 / 단위 : 중량 - Kg, 중량률 - % 국가명을 클릭하시면 상세정보가 제공됩니다.

20개씩 보기



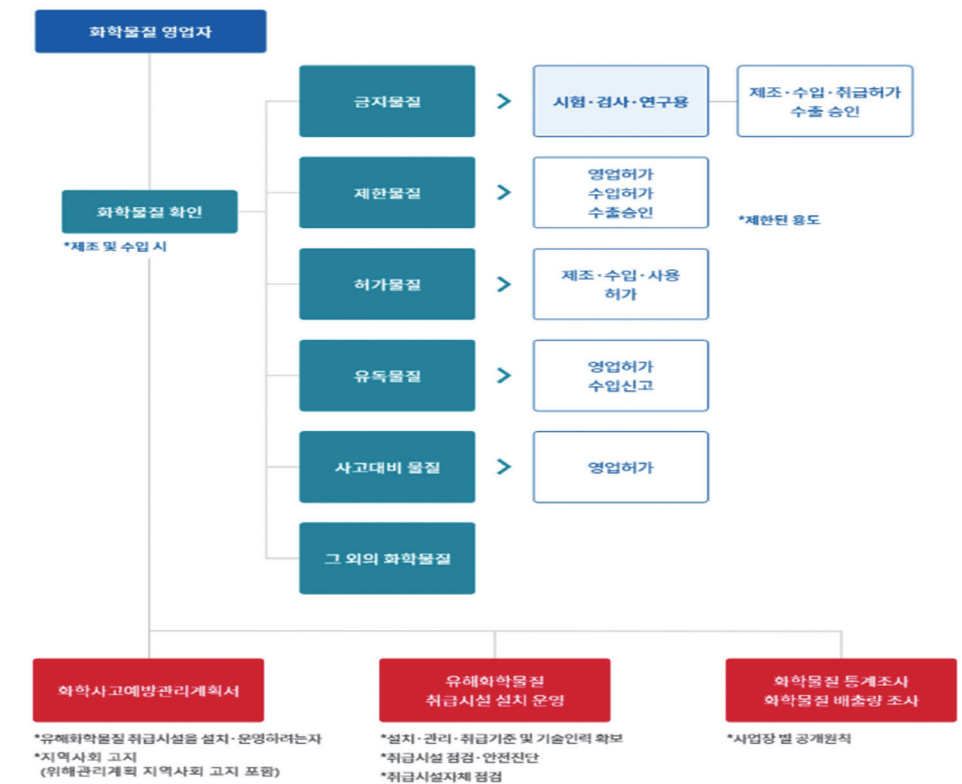
순번	국가명	2021년					2022년 (12월)				
		수출중량	수출중량률	수입중량	수입중량률	수지	수출중량	수출중량률	수입중량	수입중량률	수지
	총계	0	0.0	13,578,201	21.0	-13,578,201	3,990	0.0	9,992,124	-26.4	-9,988,134
1	폴란드	0	0.0	41,960	0.0	-41,960	0	0.0	0	0	-100.0
2	중국	0	0.0	11,077,900	22.1	-11,077,900	3,990	0.0	7,702,801	-30.5	-7,698,811
3	일본	0	0.0	0	0.0	0	0	0.0	8	0.0	
4	인도(인디아)	0	0.0	2,082,000	17.5	-2,082,000	0	0.0	2,089,100	0.3	-2,089,100
5	오스트리아	0	0.0	0	-100.0	0	0	0.0	0	0.0	
6	독일	0	0.0	376,341	0.0	-376,341	0	0.0	200,215	-46.8	-200,215



우리 협회에서는 화학물질별 신고 대상 물질 및 활동(수출입) 확인 후, 추가로 산업부를 통해 관세청으로부터 협조받은 특정화학물질의 수출입 업체목록 자료를 확인한다. 해당 자료를 통해 수출입 및 HS코드별 업체 명칭과 연락처 파악이 가능하다. 하지만 개별 기업 영업기밀 보호를 위해 업체별 수출입 물량은 제공되지 않는다. 따라서 OPCW 수출입불일치 Note Verbal을 통해 화학무기 미신고 의심 물질을 토대로, 관세청 제공 수출입업체 목록과 교차 검증한다. 여기서 관세청 제공 정보는 과거 실적을 토대로 작성되었기 때문에, 해당물질에 대한 수출입 여부 등의 현황 파악이 필요하다. 이에 협회에서는 업체별로 직접적인 연락을 통하여 화학무기 신고대상 물질 수출입 여부 및 현황을 추가로 조사한다.

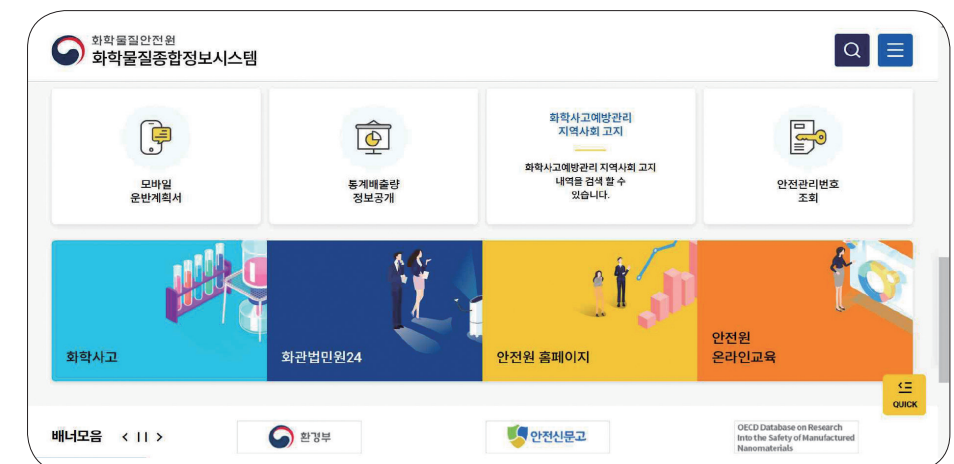
마지막으로 화학물질안전원 화학물질종합정보시스템에서 제공되는 국내 업체별 화학물질정보를 활용하여 화학무기 신고대상 물질의 연간 입고량 및 사용·판매량의 범주를 확인함으로써 업체의 신고대상 여부를 판단할 수 있다. 화학물질관리법 제12조(화학물질 조사결과 및 정보의 공개)에 의거하여 화학물질종합정보시스템은 화학물질에 대한 종합적인 정보를 일반 국민에게 제공해야 한다. 이에 환경부장관은 화학물질 통계조사와 화학물질 배출량조사를 완료한 때에는 사업장별로 그 결과를 지체없이 공개하여야 한다.

<화관법 소개>



* 자료 : 화학물질안전원 화학물질종합정보시스템

<화학물질안전원 화학물질종합정보시스템>







화학물질안전원
화학물질종합정보시스템

🔍 ☰

화학물질취급정보

화관범위반사업장

일반검색

상세검색

• 화학물질 통계조사 결과

2022년 ▼

전제지역 ▼

전제지역 ▼

CAS No. ▼

7719-12-2

#영권

#황산

#불산

검색



⏮
QUICK

⬆️
TOP



화학물질안전원

화학물질종합정보시스템




Excel 다운로드

번호	물질명칭 ▲ ▼	Cas No ▲ ▼	위급 업체수 ▲ ▼	화학물질 정보
1	삼엽화 인	7719-12-2	19	보기

◀

≡

▶

QUICK

TOP

화학물질안전원 화학물질종합정보시스템															
물질명칭	CAS No.	화학물질관리법					화 평 법	산업안전보건법 (유해인자)				위험 물 안전 관리 법	고압 가스 안전 관리 법	연간 임고 량	연간 사용 · 판매 량
		유 독 물 질	제 한 물 질	금 지 물 질	허 가 물 질	사고 대비 물질		금지 · 허가 물질	노출 · 허용 기준	직업 환경 측정 물질		위험 물 질	독성 가스		

<화관법(제8조 제1항 관련) [별표 2] 화학물질 정보 기본 공개 범위>

1. 사업장의 일반정보

<공개 예시>

사업장명	○○(주)	대표자 작성자 전화번호	홍길동 000-000-0000
소재지	000도 00시 000번지	대표업종	화학제품제조업
종업원수	00명	관할 환경청	00유역환경청
산업단지		농공단지	
유입수계명		상수원 보호구역명	
대기보전특별대책지역명		수질보전특별대책지역명	
대기배출시설종류		수질배출시설종류	

※ 본 정보는 작성자인 ○○(주)의 자료에 근거하여 작성됨

2. 유해화학물질 최대 보관·저장량 및 화학사고 발생현황

<공개 예시>

유해화학물질 보관·저장현황	보관시설의 최대 규모 범주	03 (□ 해당 없음)
	저장시설의 최대 규모 범주	03 (□ 해당 없음)
화학사고 발생현황	2010년~2014년	(1)건
화학사고 시 비상연락번호	000-000-0000	

※ 비교

가. 유해화학물질의 보관·저장현황 : 유해화학물질의 보관·저장형태별로 사업장내에서 보관·저장하는 모든 유해화학물질(제품)의 최대 보관·저장 규모(용량)를 범주로 표시(연간 입고량 및 사용·판매량 범주와 같음)

나. ① “화학사고 즉시신고에 관한 규정(환경부예규 538호)”에서 정한 화학사고의 연도별 발생건수
② 화학사고시 비상연락번호는 회사(사무실) 전화번호③ 화학사고 발생현황 : 화학물질 통계조사표
작성기준연도를 기준으로 최근 5년간 발생건수 (예시: 화학물질 통계조사는 전년도 1년간의 화학물



한국화학산업협회

질 취급현황을 기재한 화학물질 통계조사표를 작성·제출하도록 한 것이므로, 2017년에 실시한 화학물질 통계조사결과를 공개하는 경우 화학물질 통계조사표의 작성기준년도는 2016년도에 해당하며, 따라서 2012년~2016년까지의 화학사고 발생건수를 공개)

3. 화학물질 취급현황

<공개 예시>

제품명	제품정보	
	혼합물 여부	유해화학물질 여부
신너-1	☒ 혼합물, ☐ 단일물질	☒
황산(60%)	☐ 혼합물, ☒ 단일물질	☒
■■■■	☐ 혼합물, ☒ 단일물질	☐

※ 비교

가. ① 제품명 : 사업장에서 취급하는 화학제품의 명칭(단일물질이 물에 용해된 형태(수용액)는 단일 물질로 표시)

② 유해화학물질을 기준 농도 이상 함유한 경우 유해화학물질임을 표시

물질명	CAS No.	화학물질관리법 (유해화학물질)				산업안전보건법 (유해인자)			위험물 안전관리법	고압가스 안전관리법	연간 입고량	연간 사용·판매량
		유독	제한	금지	사고 대비	금지·허가	노출·허용 기준	작업 환경 측정	위험물	독성 가스		
톨루엔		☒	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☐	00	00
황산		☒	☐	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	00	00
■■■■		☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	00	00

※ 비교

나. ① 물질명 : 사업장에서 취급하는 제품에 함유된 화학물질의 명칭

② 해당물질이 화학물질관리법, 산업안전보건법, 위험물안전관리법 또는 고압가스안전관리법에 따른 유해화학물질, 유해인자, 위험물 또는 독성가스임을 표시

③ 연간 입고량은 제조, 수입, 구매, 이월된 양을 합산한 값을 범주로 표시

④ 연간 사용·판매량은, 사용, 판매, 수출된 양을 합산한 값을 범주로 표시

<연간 입고량 및 사용·판매량의 범주 구분>

구분	중량(톤/년) 또는 부피단위(m³/년)	구분	중량(톤/년) 또는 부피단위(m³/년)
01	0.1 미만	06	5 ~ 20
02	0.1 ~ 0.5	07	20 ~ 200
03	0.5 ~ 1.0	08	200 ~ 1,000
04	1 ~ 2.5	09	1,000 ~ 5,000
05	2.5 ~ 5.0	10	5,000 이상

4. 배출량조사대상 화학물질별 배출·이동량

<공개 예시>

물질명	CAS No.	물질 그룹 및 발암성	배출량			자가 매립량	이동량	
			대기	수계	토양		폐수	폐기물
		□그룹I, □ 그룹II, □ IARC1, □ IARC2A, □IARC2B						
		□그룹I, □ 그룹II, □ IARC1, □ IARC2A, □IARC2B						
		□그룹I, □ 그룹II, □ IARC1, □ IARC2A, □IARC2B						
		□그룹I, □ 그룹II, □ IARC1, □ IARC2A, □IARC2B						



III 결론

앞서 살펴보았듯이 수출입불일치는 화학무기금지지구에서 협약 이행에 위험을 초래할 가능성이 매우 큰 위중한 사안으로 판단하고 있다. 특히 수출입불일치의 원인 중 신고 누락 및 미신고의 경우 국내 생화학무기법 제28조(벌칙) 해당할 뿐만 아니라 대외적인 신뢰하락의 결과를 불러일으키는 부정적인 영향이 크다. 다만 수출입불일치의 원인이 매우 다양하고 현실적으로 완벽한 해결은 쉽지 않기 때문에, 화학무기금지협약 이행 관련 모든 이해당사자의 협조와 공동 노력이 필요하다. 따라서 세관, 산업계, 무역업계 간 협력은 수출입불일치 해결에 무엇보다 중요하고 커다란 도움이 된다. 이에 한국화학산업협회는 특정화학물질의 제조량 등 신고 접수에 관한 업무 위탁기관으로서, 국내 화학무기 미신고 업체를 적극 발굴할 계획이다.

후속으로 화학무기 미신고 업체를 대상으로 화학무기 신고 역량 강화를 위한 세미나 및 교육 등 맞춤형 프로그램을 제공할 계획이다. 동시에 해외 국별 담당기관과의 네트워크 구축 및 협력을 바탕으로 직접 소통함으로써 수출입불일치 해결을 위해서 적극 대응할 계획이다.

PART

02

정근홍 육군사관학교

AI 시대의 화학무기 통제 :
새로운 도전과 기회

- I. 서론
- II. 본론
- III. 결론





AI 시대의 화학무기 통제 : 새로운 도전과 기회

I 서론

인공지능(AI) 기술의 발전은 국제 안보 환경, 특히 화학무기 통제에 중대한 영향을 미치고 있다. 화학무기금지기구(OPCW)는 이러한 기술 발전 속에서 새로운 기회와 도전에 직면하고 있다. AI 기술은 자동화된 화학물질 합성 기술의 발전을 통해 복잡한 화학물질의 소형 합성을 가능하게 하고 있다. 예를 들어, "합성 로봇"은 작은 공간에서 복잡한 화학물질을 자동으로 합성할 수 있으며, 국내외 연구에서 24시간 내 수백 가지 화합물을 자동으로 합성할 수 있는 시스템이 개발되고 있다.

이러한 기술은 기존의 대규모 시설 기반 감시 체계를 우회할 수 있어 화학무기 통제에 새로운 문제를 제기한다. AI 기반 역합성(retrosynthesis) 기술 또한 우려를 증가시키고 있다. AI는 기존 전문가가 발견하지 못했던 새로운 합성 경로를 찾아낼 수 있으며, 이는 새로운 화학무기 개발 가능성을 높인다. 또한 이는 AI가 인간의 상상력을 뛰어넘는 수준에서 잠재적으로 위험한 결과를 초래할 수 있음을 시사한다.

반면, AI 기술은 화학무기 통제를 위한 강력한 도구도 제공하고 있다. AI 기반 실시간 가스 분석 시스템은 높은 정확도로 화학물질을 탐지하며, 딥러닝 기술을 활용한 이상 징후 감지 시스템은 잠재적 위험을 조기에 발견하는 데 기여할 수 있다. 이러한 기술은 화학무기 사용 가능성을 억제하고, 신속하고 정확한 대응을 가능하게 한다. 더 나아가, AI와 양자 컴퓨팅의 결합, 드론 기술과의 연계, 생체인식 기술의 통합 등은 화학무기 통제에 새로운 가능성을 열어줄 것으로 기대된다. AI가 탑재된 드론은 접근이 어려운 지역을 모니터링하고 실시간 데이터를 분석하며, 양자 컴퓨팅과 AI가 결합된 예측 모델은 잠재적 위험을 기존 방식보다 더 빠르게 탐지할 수 있다.

이러한 기술적 혁신에도 불구하고 해결해야 할 과제들은 여전히 많다. 우선, AI 시스템의 정확성과 신뢰성 확보가 중요하다. AI가 특정 신경작용제의 구조를 잘못 해석하면 사고로 이어질 수 있다. 데이터 품질 관리와 표준화 역시 도전 과제로, OPCW의 회원국으로부터 수집되는 데이터의 형식과 언어, 측정 단위가 상이해 통합적인 분석이 어렵다. 또한, AI 시스템이 적대적 공격(Adversarial Attack)이나 잘못 생성된 정보들로 인하여(disinformation) 판단이 왜곡될 가능성도 있다. 이를 방지하기 위한 사이버 보안 강화는 시급한 과제다.

법적·제도적 문제 역시 중요하다. 1997년 발효된 화학무기금지협약(CWC)은 AI와 같은 첨단 기술의 등장을 예상하지 못했으므로, 새로운 기술 환경에 적합한 법적 프레임워크가 필요하다. 특히 AI 시스템이 생성한 데이터의 법적 지위, 자동화 시스템의 책임 소재, AI 기술 오용에 대한 제재 방안 등이 명확히 규정되어야 한다.

이러한 상황에서 OPCW는 AI 기술의 혜택을 최대한 활용하면서도 잠재적 위험을 효과적으로 통제할 수 있는 균형 잡힌 접근을 추구해야 한다. 이는 기술적 혁신, 법적 체계의 정비, 국제 협력의 강화, 그리고 윤리적 고려사항의 반영 등을 포함하는 포괄적인 접근이 필요함을 의미한다.

본고에서는 AI 기술이 화학무기 통제 체제에 미치는 영향을 다각도로 분석하고, OPCW가 직면한 도전과 기회를 상세히 살펴보고자 한다. 특히 기술적 도전, 제도적 과제, 그리고 이에 대한 대응 방안을 체계적으로 검토함으로써, 미래 화학무기 통제 체제의 발전 방향을 제시하고자 한다.



II 본론

1. OPCW가 직면한 주요 도전 과제

가. 기술적 도전

화학물질 합성 기술의 급속한 발전, 특히 자동화된 합성 시스템의 등장은 화학무기 통제 분야에 전례 없는 도전을 제기하고 있다. 최근 연구 결과에 따르면, 작은 공간에서도 설치가 가능한 이러한 시스템들은 놀라운 수준의 합성 능력을 보여주고 있다. 단 24시간이라는 짧은 시간 동안 수백 가지의 서로 다른 화합물을 자동으로 합성할 수 있다는 점은 특히 우려할 만하다. 이러한 소형 자동화 시스템의 확산은 불법적인 화학무기 생산 시설의 탐지를 현저히 어렵게 만들고 있다.

더욱 우려되는 것은 AI 기술과의 결합이다. AI 알고리즘은 화학물질 합성의 최적 조건과 경로를 놀라운 속도로 찾아낼 수 있다. 또한 AI를 활용한 단백질 구조예측 및 분자구조와의 결합력 예측은 의약적으로 유용할 수 있지만 독성적인 측면에서 매우 위험한 시도가 가능할 수도 있다. 인간의 생명연장에 도움을 주는 여러 AI 기술은 본래 신약 개발 과정을 가속화하기 위해 개발되었으나, 악의적으로 활용될 경우 새로운 형태의 화학무기 개발에 이용될 수 있는 위험성을 내포하고 있다.

AI 시스템의 정확성과 신뢰성 문제도 중요한 도전 과제다. 현재의 AI 시스템들은 놀라운 발전을 보여주고 있지만, 복잡한 분자 구조를 분석할 때는 여전히 중대한 오류를 범할 수 있다. 이러한 종류의 오류는 화학무기 통제 체계에 치명적인 허점을 만들 수 있다. 예를 들어, 위험한 화학물질이 안전한 것으로 잘못 분류되어 통제 대상에서 제외되거나, 반대로 무해한 산업용 화학물질이 불필요하게 엄격한 통제 대상으로 지정될 수 있다.

보안 위협도 심각한 도전 과제다. 사이버 보안 위협과 AI 적대적 공격(Adversarial Attack) 그리고 잘못된 데이터의 생산으로 인한 판단오류는 화학무기 통제 분야에서 가장 시급히 해결해야 할 도전 과제로 부상하고 있다. 자동화된 합성 시스템이 해킹되어 위험한 화학물질을 생산하게 되거나, AI 분석 시스템이 속아서 위험 물질을 간과하게 된다면 그 결과는 재앙적일 수 있다.

나. 제도적 도전

화학무기금지협약(CWC)의 법적 프레임워크는 AI와 자동화 기술의 급속한 발전으로 인해 근본적인 도전에 직면하고 있다. 1997년 발효된 CWC는 당시로서는 혁신적인 군비통제 체제를 구축했지만, 현재의 기술 환경에서는 여러 한계점을 드러내고 있다. 특히 AI와 같은 첨단 기술의 등장은 협약 제정 당시에는 예측하지 못했던 새로운 차원의 도전 과제들을 제시하고 있다.

심각한 문제는 소규모 자동화 합성 시스템의 등장이 기존의 생산량 기반 규제 체계의 근본적인 한계를 드러내고 있다는 점이다. 현행 CWC는 일정 규모 이상의 생산 시설에 대한 규제를 중심으로 설계

되었다. 그러나 현대의 자동화 시스템은 매우 작은 규모로도 상당한 양의 화학물질을 효율적으로 생산할 수 있다. 자동화 합성 시스템이 매우빠르게 새로운 신규 화합물을 합성할 수 있는 현실에서, 단순히 시설의 규모나 생산량만을 기준으로 하는 규제는 더 이상 효과적이지 않다.

국가 간 기술 격차 문제는 날로 심화되고 있으며, 이는 글로벌 화학무기 통제 체제의 효과성을 심각하게 저해할 수 있는 요인으로 대두되고 있다. 특히 AI 기술의 급속한 발전은 선진국과 개발도상국 간의 기술력 차이를 더욱 벌어지게 만들고 있다. AI 기반 감시 시스템은 현대 화학무기 통제에서 필수적인 도구가 되어가고 있으며, 이러한 시스템의 부재는 해당 국가들의 화학무기 통제 능력을 심각하게 제한할 수 있다.

데이터 공유와 국제 협력의 문제도 복잡해지고 있다. 각국은 자국의 안보 이익과 산업 경쟁력 보호를 위해 민감한 데이터의 공유를 꺼리고 있다. 특히 자동화 합성 시스템과 관련된 데이터는 극도로 민감한 사안으로 취급되고 있다. 이러한 시스템들은 의약품 개발부터 신소재 제조에 이르기까지 광범위한 산업적 응용 가능성을 가지고 있어, 관련 데이터는 높은 경제적 가치를 지닌다. 동시에 이 기술들은 잠재적으로 화학무기 생산에도 활용될 수 있어, 국가 안보적 측면에서도 매우 민감한 정보로 간주된다.



2. AI가 제공하는 기회와 미래 발전 방향

가. 새로운 기회

화학무기 통제 분야에서 AI 기술의 도입은 감시와 검증 능력을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 기회를 제공하고 있다. 특히 실시간 모니터링 분야에서 AI 기술은 주목할 만한 성과를 보여주고 있다. AI 기반 센서 네트워크의 도입으로 24시간 연속 감시가 가능해졌으며, 이는 기존의 인력 기반 감시 체계가 가지고 있던 시간적, 물리적 한계를 크게 극복했다.

2023년에 개발된 최신 양자화학계산 기반 화학무기 분석 시스템은 특히 주목할 만한 성과를 보여주었는데, 이 시스템은 GC-MS의 오류를 잡아주는 것을 입증했다. 이는 기존의 수동 검사 방식과 비교할 때 획기적인 발전이라 할 수 있다. 더욱 주목할 만한 것은 딥러닝 기술을 활용한 이상 징후 감지 시스템의 발전이다. 이 시스템은 정상적인 패턴에서 벗어나는 미세한 변화도 감지할 수 있어, 잠재적인 위험을 매우 빠르게 발견할 수 있다.

화학 시설의 안전성 모니터링 분야에서도 AI는 혁신적인 변화를 가져오고 있다. AI 기반 실시간 모니터링 시스템은 화학 시설의 운영 상태를 24시간 감시하며, 잠재적인 위험 요소를 즉각적으로 식별할 수 있다. 이 시스템은 온도, 압력, 화학물질 농도 등 수많은 변수를 동시에 추적하며, 정상 범위를 벗어나는 미세한 변화도 즉시 감지할 수 있다.

예측적 유지보수 시스템의 도입은 또 다른 중요한 진전이다. AI는 장비의 성능 데이터를 지속적으로 분석하여 잠재적인 고장을 사전에 예측할 수 있다. 예를 들어, 특정 밸브의 미세한 성능 저하를 AI가



감지하여, 실제 고장이 발생하기 전에 유지보수를 수행할 수 있다. 이는 심각한 사고의 위험을 크게 줄일 수 있는 중요한 발전이다.

더불어 클라우드 기반의 협업 플랫폼은 전 세계 연구자들이 시간과 공간의 제약 없이 함께 연구를 수행할 수 있는 환경을 제공한다. 이러한 플랫폼은 연구 데이터의 실시간 공유, 공동 분석, 그리고 즉각적인 피드백을 가능하게 함으로써 연구의 효율성과 품질을 크게 향상시킨다.

나. 미래발전 방향

화학무기 통제 분야에서 AI 기술의 지속가능한 발전을 위해서는 체계적이고 포괄적인 접근이 필요하다. 첫째, AI 거버넌스 체계의 고도화가 시급하다. 시스템의 투명성과 책임성을 보장하는 것은 국제 사회의 신뢰를 유지하는데 필수적이다. 예를 들어, AI 시스템이 특정 화학 시설을 의심 시설로 분류할 때, 그 판단 과정과 근거가 명확하게 설명될 수 있어야 한다. 윤리적 가이드라인의 실효성을 높이기 위한 모니터링 체계의 구축도 중요한 과제이다. 단순히 가이드라인을 제정하는 것을 넘어, 이의 준수 여부를 효과적으로 감독할 수 있는 시스템이 필요하다. 이를 위해 독립적인 감독 기구의 설립, 정기적인 준수 평가, 그리고 위반 사례에 대한 체계적인 대응 방안 등이 전세계적 차원에서 검토되고 있다.

둘째, 기술 역량 강화 프로그램의 확대가 필요하다. 화학무기 통제와 AI 기술을 모두 깊이 있게 이해하는 전문가의 양성이 시급하다. 온라인 교육 플랫폼의 활용은 지속적인 역량 강화를 위한 핵심 도구가 될 수 있을 것이다. 이러한 플랫폼은 시간과 공간의 제약 없이 학습할 수 있는 환경을 제공하며, 최신 기술 동향을 신속하게 반영할 수 있다는 장점이 있다.



셋째, 국제 협력의 강화가 필수적이다. 데이터 공유 플랫폼의 구축과 공동 연구 개발은 화학무기 통제 체제의 효과성을 근본적으로 향상시킬 수 있다. 특히 암호화 기술과 분산 원장 기술을 활용하여 민감한 정보의 보안을 유지하면서도 필요한 데이터 공유가 가능하도록 하는 시스템의 구축이 필요하다.

마지막으로, 지속가능한 발전 체계의 구축이 중요하다. 환경적인 측면에서의 책임성과 장기적 발전 전략이 핵심적으로 고려되어야 한다. AI 시스템의 운영에는 상당한 양의 에너지가 소비되며, 이는 환경에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 에너지 효율적인 AI 시스템의 개발과 함께, 탄소 중립을 고려한 기술 발전 전략의 수립이 필요하다.

III 결론

AI 기술은 화학무기 통제의 미래를 근본적으로 변화시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 이러한 변화를 성공적으로 관리하고 긍정적인 방향으로 이끌어가기 위해서는, 기술적 혁신과 제도적 발전이 조화롭게 이루어져야 한다. 특히 AI 거버넌스의 확립, 국제 협력의 강화, 그리고 지속가능한 발전 체계의 구축이 핵심적으로 고려되어야 할 것이다.

이를 위해서는 몇 가지 중요한 과제들이 우선적으로 해결되어야 한다. 첫째, AI 시스템의 투명성과 신뢰성 확보가 필수적이다. AI의 판단 과정과 결과가 명확하게 설명될 수 있어야 하며, 이를 검증할 수 있는 체계가 마련되어야 한다. 둘째, 국가 간 기술 격차 해소를 위한 실질적인 지원 프로그램이 확대되어야 한다. 개발도상국들이 AI 기술을 효과적으로 활용할 수 있도록 인프라 구축, 전문가 양성, 기술 이전 등의 지원이 체계적으로 이루어져야 한다. 셋째, 데이터 공유와 국제 협력을 위한 안전하고 효율적인 플랫폼이 구축되어야 한다. 이는 국가 안보와 산업 기밀을 보호하면서도 필요한 정보 공유가 가능한 균형 잡힌 시스템이어야 할 것이다.

더불어, 화학무기 통제 체제의 법적·제도적 프레임워크도 현대 기술 환경에 맞게 개선되어야 한다. 1997년에 발효된 CWC는 AI 시대의 새로운 도전과 기회를 반영하여 현대화될 필요가 있다. 특히 AI 시스템이 생성한 데이터의 법적 지위, 자동화 시스템의 책임 소재, AI 기술 오용에 대한 제재 방안 등이 명확히 규정되어야 한다. 또한, 윤리적 가이드라인의 수립과 이행을 위한 국제적 합의도 이루어져야 할 것이다.

OPCW와 국제 사회는 이러한 도전과 기회의 시대에 더욱 효과적이고 지속가능한 화학무기 통제 체제를 구축하기 위해 지속적인 노력을 기울여야 할 것이다. 이는 단순한 기술적 진보를 넘어, 국제 사회의 평화와 안전을 보장하기 위한 필수적인 과제라고 할 수 있다. AI 기술의 발전이 가져올 수 있는 위험을 효과적으로 통제하면서도, 그 혜택을 최대한 활용하여 더욱 안전한 세계를 만들어가는 것이 우리의 궁극적인 목표가 되어야 할 것이다.



참고문헌

1. Zeng, K. et. al (2024). Deep learning for chemical synthesis planning: Molecular transformations as graph edits. Journal of Cheminformatics, 24(8), Article 877. Available at: <https://jcheminf.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13321-024-00877-2>
2. Yan, C. et. al (2021). RetroComposer: Composing templates for template-based retrosynthesis prediction. arXiv Preprint. Available at: <https://arxiv.org/abs/2112.11225>
3. Jeong, K. et. al (2024). DFT-Spectroscopy Integrated Identification Method on Unknown Terrorist Chemical Mixtures by Incorporating Experimental and Theoretical GC-MS, NMR, IR, and DFT-NMR/IR Data. Analytical Chemistry, 96(2), 694-700.
4. Lancaster University. (2023). Enhancing manufacturing security with AI-driven anomaly detection. Available at: <https://www.lancaster.ac.uk/business/case-studies/enhancing-manufacturing-security-with-ai-driven-anomaly-detection>
5. Institute for Basic Science. (2024). Advanced Research in AI-based Chemical Safety. Available at: <https://www.ibs.re.kr/cars/>
6. Jiao, Z. et. al (2020). Machine Learning and Deep Learning in Chemical Health and Safety: A Systematic Review of Techniques and Applications. ACS Chemical Health and Safety, 27, 316–334.
7. Yaqoob, U. et. al (2021). Chemical Gas Sensors: Recent Developments, Challenges, and the Potential of Machine Learning—A Review. Sensors, 21(8), Article 2877. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2877>
8. Sigma-Aldrich. (2023). Advanced retrosynthesis using SYNTHIA™. Available at: <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/aldrich/synthia>
9. University of Bristol. (2023). Bristol Automated Synthesis Facility. Available at: <https://www.bristol.ac.uk/chemistry/facilities/basf/>
10. Lawrence Berkeley National Laboratory. (2023). Meet the autonomous lab of the future. Available at: <https://newscenter.lbl.gov/2023/04/17/meet-the-autonomous-lab-of-the-future/>

