

암모니아 누출 사고에 따른 환경피해 영향 범위 예측

이연희, 남근우, 염혜성, 김보경, 신창현, 김재영*

A Study on Environmental Damage Impact by Ammonia Accident

Yeonhee Lee , Gnu Nam , Hyesung Yeom , Bokyeong Kim , Changhyun Shin  and Jae-Young Kim *

환경부 화학물질안전원

National Institute of Chemical Safety, Ministry of Environment, Cheongju 28164, Republic of Korea

* Correspondence: jykim@korea.kr

Abstract: This study was performed to evaluate the potential damage caused by a chemical accident through the analysis of off-site consequence (OCA) and the presence of ammonia residues in crops. The assessment of OCA was carried out for worst-case and alternative-case scenarios. To determine the ammonia residues in crops, samples were collected from both sweetpotato (SW) and wormwood (WW) crops in 9 separate groups within the affected area, and the ammonium levels were quantified using ion chromatography. As a result of the OCA, for the worst- and alternative-case scenarios, the impact distances were estimated at 1.6 km and 666 m from the accident site, respectively. In the impacted zone, SW samples exhibited ammonia concentrations ranging from 69.6 to 218.0 mg/kg, which were up to 16.9 times higher than those in the unaffected areas. Meanwhile, WW samples in both the worst- and alternative-case scenarios showed lower ammonia, with concentrations varying from 62.2 to 77.8 mg/kg and 49.0 to 67.8 mg/kg, respectively. These results indicate that the ammonium residue in crops outside the affected area is at least 49 mg/kg due to the inherent ammonium in plants, the application of nitrogen fertilizer, and various nitrogen sources. Thus, it may not be possible to predict the actual impact range accurately. However, the simultaneous assessment of OCA and the residue analysis offers valuable insights into the initial contamination levels of the accident-affected area.

Keywords: ammonia, chemical accident, crops, environmental damage, off-site consequence analysis

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.01>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 1-10

Received: January 28, 2024

Revised: March 4, 2024

Accepted: March 18, 2024

Published: April 11, 2024

Online ISSN: 1233-4173
Print ISSN: 1225-3537



서 론

화학물질은 석유화학, 중화학, 철강, 반도체 등 우리나라의 주요 산업 분야를 이루는 중요한 소재로 활용되며, 의류, 식품, 의약품, 건축자재, 가정용품 등의 인간에게 필수불가결한 일상용품을 생산하는 데 사용되고 있다. 이처럼 다양하고 광범위하게 사용되는 화학물질은 급속한 산업 발전과 인간의 생활 수준 향상에 크게 기여하였지만, 독성, 잔류성, 화재·폭발성, 확산성 등 유해·위험성의一面을 가지고 있어 취급 부주의 또는 안전 부재 시 화학물질을 취급하는 사업장에서 크고 작은 화학 사고가

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



빈번하게 발생하고 있다. 2020년 기준으로 환경부에 신고된 국내 화학 사고 건수는 7년간 총 583건으로 보고된 바 있으며, 이중 대표적인 염기성 물질로 알려진 암모니아 사고가 70건으로 집계되어 우리나라에서 빈번하게 발생하는 사고 다발 물질로 확인되고 있다[1,2]. 특히, 암모니아는 우리 주변에 쉽게 찾을 수 있는 식품을 보관하는 사업장에서 냉동창고의 냉매로 널리 이용되고 있으며, 최근 냉동창고 시설에서 암모니아 누출 사고가 빈번하게 발생함에 따라 화학사고 예방을 위해 중점적 관리가 필요한 화학물질 중 하나이다[2].

암모니아는 무색 자극성을 나타내는 기체로 공기보다 가벼워(비중 0.59) 가스 상으로 대기 중에 누출되면 빠르게 확산하는 특성을 가지며, 물에 대한 용해성이 크고 산성 물질과 반응할 경우 부식성 가스를 형성할 뿐 아니라 밀폐공간에서는 폭발의 위험성도 존재하기 때문에 화학 사고가 발생할 경우 지역 주변에 심각한 환경피해를 초래한다[2,3]. 또한, 부식성이 강한 물질로서 인체 노출 시, 피부 자극, 화상, 동상, 호흡곤란, 폐부종, 눈 자극 등을 일으키며, 심하게는 피부에 영구적인 흉터, 실명 등을 일으킬 수 있는 인체에 매우 유해한 물질이다[3]. 이처럼 암모니아는 인체와 환경에 매우 유해한 사고대비물질 중 하나이기 때문에 화학 사고가 발생하면 주변 환경의 오염도와 피해 정도를 예측할 수 있는 방법을 강구하는 등 화학 사고의 원인 및 영향조사를 신속하게 진행하여 인적·물적 피해의 최소화와 사고대응 수습이 무엇보다도 중요하다.

암모니아 화학 사고에 대한 피해 영향 평가 연구는 여러 연구자들에 의해 진행되고 있는데, 냉동 제조 시설의 암모니아 누출 사고 위험 분석 연구[4], 냉동시설 내 암모니아 누출 사고 시 피해 범위 및 대피 거리 산정 연구[2], 암모니아 화학 사고 피해를 줄이기 위한 제도개선 연구[1], 암모니아 냉동시설의 폭발 사례 분석을 통한 재발 방지 대책 연구[5], 암모니아 누출 사고 시 주민 대피 및 알림 결정을 위한 피해 영향 거리 산정식 개발 연구[6], 암모니아 누출 사고 영향 범위 결정 기여 요인 연구[7], 복합화력발전소 연료로 암모니아 적용을 위한 사고 영향 평가 연구[8] 등이 대표적이다. 하지만 대부분의 연구가 대기 확산 모델을 통한 영향 범위 예측과 가능성을 확인하는 정도에 국한되어 있어 화학사고 시 주변 환경 인자를 고려하여 실제 피해 범위를 예측하는 데 부족함이 있다. 또한, 암모니아는 상온에서 기체 상태로 누출될 경우 공기보다 가벼워 대기 중에 빠르게 확산하는 특성을 가지고 있어[2], 실제 피해 범위를 평가하기 매우 어렵다. 따라서 이를 뒷받침할 수 있는 과학적 근거와 판단기준을 검토하기 위한 연구가 지속적으로 필요한 실정이다.

이에 본 연구는 실제 암모니아 누출 사고 사례를 배경으로 사고유형에 따른 사고시나리오를 선정하여 사고 영향 범위 예측치를 평가한 후, 사고 반경 내 암모니아로 인해 피해를 받은 농작물의 잔류오염도를 측정하여 화학사고 발생 시 신속하게 주변 환경의 피해 정도를 예측할 수 있는 방법을 마련하고자 수행되었다.

재료 및 방법

사례연구

본 연구는 냉동창고에 공급되는 냉매로서 암모니아를 취급하는 사업장에서 암모니아 리시버 탱크와 연결된 배관의 밸브를 교체하는 작업 과정 중 전단밸브 이상으로 인해 완전히 차단되지 않고 열려있던 밸브에서 암모니아가 누출된 사고를 배경으로 수행되었다. 사고 발생 시설(리시버 탱크) 기준으로 동쪽 방향 바로 측면에는 사업장 경계가 있고 그 경계 밖에 고구마밭이 위치하며, 북쪽은 차량 도로가 위치하였다. 사고 시점으로부터 당일 주 풍향은 남동풍으로 1.1 m/s의 안정된 기상 상태를 보였으며, 평균 대기 기온은 25.1°C, 평균 상대습도는 약 85%였다. 대표적인 피해로는 차량 도로 갓길에 자생하는 쑥 등 식물체가 갈변 및 고사되었고, 사고지역 바로 옆인 동쪽 방향의 고구마밭에는 직접적인 영향을 주어 고구마 잎이 갈변되는 피해가 발생되었다.

사고 영향 범위 분석

사고 영향 범위 분석(Off-site consequence analysis; OCA)은 Kim 등[9]의 방법으로 화학물질안전원의 사고시나리오 선정에 관한 기술 지침 및 사고 영향 범위 산정에 관한 기술 지침에 따라 최악 및 대안의 사고시나리오를 선정하여 사고 영향 범위를 예측 평가하였다. 평가 프로그램은 대한민국 환경부에서 배포한 KORA 소프트웨어(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)와 미국 환경보호청에서 배포한 ALOHA 소프트웨어(Areal Location of Hazardous Atmospheres)를 이용하여 도출하였다. 평가대상은 암모니아를 사용하는 4.5 m³ 용량의 리시버 탱크와 연결된 배관의 밸브 구간으로 취급 물질의 기본정보(Table 1)와 시나리오 구간인 리시버 탱크 설비의 운전 정보(Table 2)를 고려하여 평가하였다. 사고시나리오의 선정은 최악 및 대안의 사고시나리오로 구분하는데,

최악의 사고시나리오는 설비의 최대량이 누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향 범위가 최대인 경우를 말하고, 대안의 사고시나리오는 최악의 사고시나리오보다 현실적으로 발생 가능성이 높고 사람이나 환경에 미치는 영향이 최대인 사고시나리오를 말한다. 따라서 끝점농도, 기상 조건, 지표면 상태, 누출 온도, 누출량, 누출 시간 등을 각 시나리오별로 평가 조건을 달리하여 분석하였다(Table 3). 즉, 모든 시나리오는 암모니아 설비 연결 배관에서 독성물질이 누출되어 확산하는 경우로서 끝점 기준을 ERPG-2 값인 150 ppm으로 적용하였으며, 기상 조건은 최악의 사고시나리오는 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F, 온도 25°C, 습도 50%를 적용하고, 대안의 사고시나리오는 사고 당시 기상 조건인 풍속 1.1 m/s, 대기안정도 D, 온도 25.1°C, 습도 85%를 적용하였다. 지표면의 굴곡도는 시골 지형으로 하였으며, 누출량 산정은 최악의 사고시나리오의 경우 리시버 탱크 내 취급하는 암모니아의 최대량이 10분 동안 전량 방출되어 확산하는 것으로 가정하였고, 대안의 사고시나리오는 누출량 산정을 위해 누출공 크기는 가장 큰 연결 배관 직경 25 mm로 가정하였고, 누출 시간은 미국석유화학협회의 위험기반검사 기준(API recommended practice 581)에 따른 산출 방법에 따라 겹출 시스템과 차단 시스템을 고려하여 40분으로 산정하였다. 또한, 화학물질안전원의 사고 영향 범위 산정에 관한 기술 지침에 따라 가우시안 플룸 모델을 사용하여 영향 범위를 산정하였다.

Table 1. Physicochemical properties of ammonia

Chemical	CAS No.	State	Toxicity	Boiling point	Vapor pressure
Ammonia	7664-41-7	Gas and Liquid	ERPG-2 (150 ppm)	-33.43°C	1.00 MPa

Table 2. Specification of receiver tank device

Device	Chemical	State	Connection information	Volume
Receiver tank	Ammonia	Gas	25 mm	4.5 m ³

Table 3. Evaluation condition for scenario

Endpoint	Weather conditions	Scenario	
		Worst	Alternative
Toxic concentration		ERPG-2	
Thermal radiation		5 kW/m ² (40 s)	
Explosive overpressure		1 psi	
Wind speed		1.5 m/s	1.1 m/s
Temperate		25°C	25.1°C
Humidity		50%	85%
Stability		F	D
Surface curvature		Country	
Leak temperature		Operation temperature	
Leak duration		10 min	40 min

실험실 내 암모니아 노출 실험

암모니아 노출에 따른 식물체 피해 영향을 실험실 내에서 가시적으로 확인하기 위해 와그너포트 내 콩을 생장시킨 후, 식물 생장이 중기 단계가 되었을 때 암모니아수를 분무하여 노출 처리하였다. 사전 실험을 통해 암모니아 노출 농도와 경과 시기를 선정하였는데 반점, 색침착, 괴사, 황화 및 백화 현상 등 콩의 가시적 피해 증상이 확인 가능한 농도를 28%로 판단하였고, 화학사고 발생 시 초기 상태 및 시간이 지난 후 식물 피해 확인이 가능한 노출 시기를 30일로 판단하였다. 즉, 암모니아 노출 시 즉시 괴사하지



Fig. 1. Crop sampling sites in chemical accident area.

*CSP1~3: Sweetpotato sample in central direction from accident site, LSP1~3: Sweetpotato sample in left direction from accident site, RSP1~3: Sweetpotato sample in right direction from accident site, WW1~3: Wormwood sample near the accident site, WW4~6: Wormwood sample in 600 to 800 m away from accident site, WW7~9: Wormwood sample in 1.6 to 1.8 km away from accident site.

않는 범위의 28% 암모니아수를 제조하였고, 콩 작물에 직접 노출시키기 위해 미스트 분무기를 사용하여 28% 암모니아수 50 mL를 식물 전체에 분사하였으며, 노출 후 1일, 14일, 30일 경과기간 동안 식물 노출 상태를 확인하였다.

사고지점 시료

사고지점 바로 옆인 밭 토양에 식재된 고구마잎을 잔류 오염도 분석 시료로 채취하였다. Fig. 1과 같이 고구마잎의 갈변과 고사가 육안으로 확인되는 부분까지로 하여 고구마밭 토양의 중간 3개 지점(CSP1, CSP2, CSP3), 중간 지점 기준으로 좌측 방향 3개 지점 (LSP1, LSP2, LSP3), 우측 방향 3개 지점(RSP1, RSP2, RSP3) 등 총 9점을 채취하였으며, 이 중 CSP3, LSP3 및 RSP3 지점은 가시적 노출 피해가 발생하지 않은 지점으로 고구마 잎에 갈변 및 고사가 발생하지 않은 시료를 채취하였다. 또한, 주변 지역 환경매체 피해 여부를 비교하기 위해 사업장 60~80 m 반경 내 갈변 및 고사가 확인된 총 3점(WW1, WW2, WW3)과 대조군으로 사고지점으로부터 약 600~800 m 떨어진 곳에 자생하는 총 3점(WW4, WW5, WW6), 약 1.6~1.8 km 떨어진 곳에서 자생하는 총 3점(WW7, WW8, WW9)을 각각 채취하여 분석 시료로 사용하였다.

시료 전처리 및 분석 방법

시료의 전처리는 식물체 잎을 잘게 자른 시료 약 5 g을 증류수 50 mL로 정용한 후 교반기에서 15분간 진탕하여 추출하였고, 이 추출액은 0.45 μm membrane filter로 여과한 후 분석용으로 사용하였다. 암모늄 이온 함량은 이온크로마토그래프(Dionex ICS-2100, Thermo Fisher Scientific, Singapore)를 사용하였다. 분석용 컬럼은 양이온 분석전용 컬럼인 IonPac CS12A 컬럼(ThermoFisher Scientific Dionex, USA)을 사용하였고, 컬럼 온도는 30°C, 이동상은 20 mM MSA를 사용하여 분당 1 mL/min 속도로 유지시켜 Table 4와 같은 조건으로 암모늄 이온을 측정하였다.

Table 4. IC parameter for the analysis of ammonium ion

Parameter		Condition
Pump	Type	Isocratic
	Flow rate	1.0 mL/min
Eluent	Base	Distilled Water
	Generator Cartridge	Dionex EGC III MSA
Concentration and Its Mode		20 mM, Isocratic
Column		Dionex IonPac CS12A
Column temperature		30°C
Cell temperature		35°C
Suppressor		CERS 500 4 mm
Suppressor current		59 mA
Runtime		15 min

통계처리

통계분석은 SPSS ver. 25.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 소프트웨어를 이용하여 측정하였다. 즉, 데이터 간의 유의차는 One way ANOVA의 Duncan's multiple range test를 통해 $p<0.05$ 수준에서 검증하였다.

결과 및 고찰

사고시나리오 설정 및 사고 영향 범위 평가 결과

암모니아가 저장된 리시버 탱크에서 냉동창고로 냉매를 공급하기 위한 이송 공정을 시나리오 구간을 설정하고, 밸브 이상으로 암모니아가 누출된 사고를 가정하여 KORA 소프트웨어를 통해 사고 영향 범위를 추정한 결과는 Fig. 2와 같다.

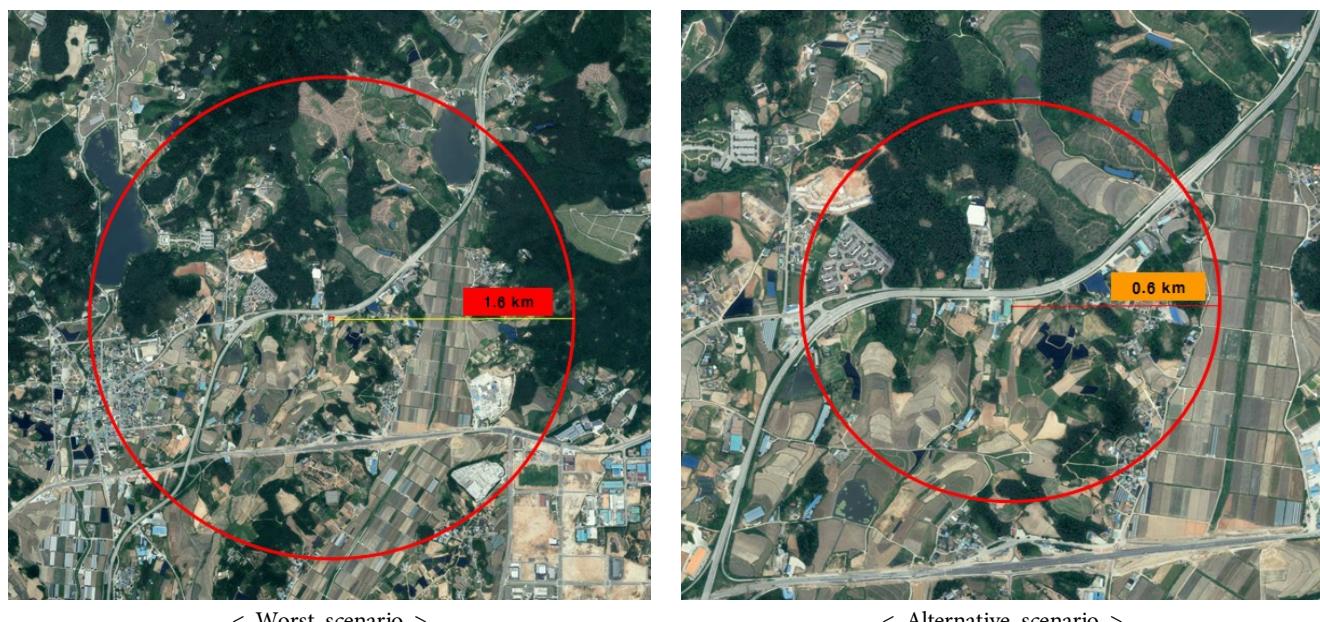


Fig. 2. Results of off-site consequence analysis (OCA) using KORA software (Korea off-site risk assessment supporting tool).

KORA 소프트웨어 구동 결과, 최악 및 대안의 사고시나리오 영향 범위는 각각 사고 발생지점으로부터 2.4 km 및 949 m 반경으로 평가되었다. 그러나 사고 당시 암모니아 리시버 탱크는 건물 내에 위치하였기 때문에 화학물질안전원의 사고시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따라 실내 취급 시설 조건의 완화 지수를 적용하여 재평가한 결과, 최악의 사고시나리오 영향 범위는 1.6 km 반경, 대안의 사고시나리오는 666 m의 피해 예측 범위가 산정되었다(Fig. 2). 반면, direct source model 방법을 이용해 누출량을 적용할 수 있는 ALOHA 소프트웨어를 통해 사고 영향 범위를 평가한 결과 2.4 km의 피해반경이 산정되었다. ALOHA의 경우, 실내 시설 조건 반영이 어렵기 때문에 완화지수가 적용된 KORA 평가 결과와는 다소 차이가 있었지만(Table 5), 실내 시설 조건이 적용되지 않은 KORA의 최악 사고시나리오 영향 범위 결과와는 유사한 경향이었다. 이러한 결과를 보인 이유는 ALOHA에 대입한 누출률이 KORA에서 도출된 대안의 사고시나리오 누출률 4.7 kg/s를 적용하였고, ERPG-2 기준으로서 150 ppm에 도달하는 지점을 끝점 농도 기준으로 두 소프트웨어에 동일하게 적용하였기 때문으로 판단되며, ALOHA 모델이 대기 중 환경인자를 고려했을 때 다소 보수적인 결과를 나타낸 것으로 추정된다[10,11]. 하지만 상기 두 소프트웨어에 적용된 누출량은 실제 사고 현장에서 누출된 수준과는 다소 차이가 있을 것으로 추정되며, ALOHA 소프트웨어의 경우 가압된 액체 설비 누출에 대한 시나리오가 제공되지 않기 때문에 사고 영향 범위를 예측하는 데 있어 다소 제한사항이 존재하는 것으로 보인다.

Table 5. Results of off-site consequence analysis (OCA) using ALOHA software (Areal Location of Hazardous Atmospheres)

Red (ERPG-3)	Orange (ERPG-2)	Yellow (ERPG-1)
0.6 km	2.4 km	7.5 km

이러한 결과와 관련하여 암모니아 누출 시나리오에 대한 Park 등[11] 및 Jeong 등[8]의 OCA 평가 결과에서 암모니아 저장소 누출 시 ERPG-2 기준으로 4 km의 영향 범위를 나타냈고, 암모니아 탱크로리 누출 시 ERPG-2 기준으로 7.7 km의 영향 범위를 확인한 결과와는 다소 차이가 있었다. 이는 사고시나리오 영향 범위에 영향을 줄 수 있는 지면 굴곡도, 시설의 형태, 온도/압력 조건 등의 변화, 누출공 크기 등 시나리오 입력변수에 따라 대기 확산 범위에 큰 영향을 미친 결과로 보인다[7]. 따라서 OCA 평가를 통해 도출된 대안의 사고시나리오 영향 범위는 사고 현장에서 발생할 수 있는 기상조건의 경시적 변화, 암모니아의 화학적, 열역학적 특징 등에 따라 발생할 수 있는 다양한 변수를 모두 적용하기 어렵고 모델링 방법, 시나리오 입력변수에 따라 다소 차이가 발생하기 때문에 사고시나리오 예측 범위에 대한 평가는 노출 지역의 암모니아 잔류오염도를 추가적으로 실시하여 OCA 평가 범위와 실제 확산거리에 대한 비교 검토가 필요한 것으로 판단된다.

암모니아 노출에 따른 농작물 변화

암모니아수 28% 용액을 콩 작물에 직접 분사 노출시켜 영향을 받은 콩잎의 가시적 피해양상을 확인한 결과는 Fig. 3과 같다. 노출 전의 콩잎은 본래 색인 청록색을 띠다 노출 이후 시간이 경과함에 따라 회갈색으로 변하는 경향이었다. 즉, 1일 경과 후에는 염연 전체에 퍼져 회갈색을 띠는 현상이 확인되었고, 점차 잎 선단부터 황화 및 백화 현상이 진행되면서 30일 경과 후에는 잎 전체에서 괴사가 뚜렷이 진행됨을 확인할 수 있었다. 이는 과잉의 암모니아가 엽록체를 파괴시켜 광합성 작용을 저하시키고, 수체 내의 pH를 상승시켜 뿌리의 수분 흡수도 억제하면서 노출 이후 시간이 경과함에 따라 잎 전체가 고사된 것으로 추정된다. 이러한 현상과 관련하여, 실제 사고 당시 현장의 고구마 잎 등 농작물에는 암모니아 노출 이후 회갈색 반점이 발견되었고, 시간이 경과하면서 잎 전체가 탈색되고 점차 괴사하는 현상을 나타내었다. Lee 등[12]은 암모니아 가스 노출에 따른 난과 식물의 가시적인 피해증상을 확인할 결과, 팔레놉시스, 텐파레, 심비디움 등 대부분 식물의 잎이 탈색되는 현상을 보였고, 초기 회갈색을 띠다 점차 황갈색으로 변하면서 말라가는 현상을 확인한 바 있다. 아울러, 이러한 식물 피해기작은 암모니아가 식물 잎의 기공과 표피조직을 통해 세포 내 흡수되면 알칼리 반응을 나타내면서 색소를 파괴하고 잎을 변색시킨다고 보고된 바 있다. 한편, Park 등[13]은 사염화규소 및 염산 노출에 따른 식물 잎의 변화가 염화수소에 의해 유기물 산화가 발생하고, 기공으로 흡수되어 엽록소가 파괴되면서 잎이 황갈색 또는 회백색으로 고사하는 현상을 보였고, Kim 등[9]은 불산 노출로 인해 발생된 불화수소가 주변 농작물 체내에 흡수되어 세포 사멸, 엽록소 파괴, 증류 현상 등에 의해 황갈색 갈변 및 고사한 현상을 보고한 바 있다. 따라서 본 연구의 노출 실험에서도 직접적으로 노출된 암모니아가 식물 표면 파괴뿐 아니라 체내에서 세포 및 엽록소 파괴를 일으켜 염연이 탈색되고 나아가 황갈색 및 회백색의

고사 현상이 일어난 것으로 추정된다.



Before exposure



After 1 day exposure



After 14 day exposure



After 30 day exposure

Fig. 3. Visible changes of before and after ammonia exposure on soybean.

이와 같이 사전 식물체 내 암모니아 노출시험을 통해 확인된 황화, 백화, 갈변, 고사 현상 등을 바탕으로 암모니아 누출 사고 당시 주변 식물체의 가시적 피해 범위를 식물체 변화로 추정하였고, 가시적 노출 피해를 받은 식물체와 가시적 노출 피해를 받지 않은 식물체를 채취하여 암모니아 잔류오염도를 측정함으로써 실제 피해를 받은 범위를 확인하고 OCA에 의해 평가된 시나리오 영향 범위와의 비교 검토가 필요한 것으로 판단된다.

암모니아 사고에 따른 농작물의 가시적 피해범위

암모니아 누출지점의 가시적 피해범위를 조사하기 위해 갈변, 고사 등의 식물체 변화가 육안으로 확인된 가시적 노출 피해양상은 Fig. 4와 같다.

사고 당일 풍향이 북동풍 → 남서풍 → 북풍 → 남동풍으로 주기적인 변화를 나타내었는데 실제 누출지역 주변의 주 피해는 남동쪽으로 두드러지게 발생되어 가시적으로 확인된 식물체의 노출 피해 범위는 67 m 내외인 것으로 확인되었다. 이는 사고 초기에 누출된 암모니아 가스가 남동쪽 방향으로 확산된 요인이 가장 큰 것으로 추정되지만, 사고 당일 발생한 강우에 의해 확산된 암모니아 가스가 빗물에 희석되고 이를 통해 지면에 유입된 액상 암모니아가 빙고탕과 지면의 경사도를 통해 남동쪽 방향으로 유입되면서 사고지점으로부터 동쪽 방향에 위치한 고구마밭에 가장 큰 피해를 끼친 것으로 보이며, 풍향, 유입경로 등의 여러 요인이 복합적으로 작용하여 가시적 노출 피해 범위는 남동쪽 방향이 가장 큰 것으로 추정된다. 반면에 사고지점으로부터 북쪽에 위치한 도로 가변에 서식하고 있는 쑥 등의 식물체에도 영향을 미쳐 북쪽 방향으로 약 60 m 반경 내의 가시적 피해양상이 확인되었는데, 사고 당일 풍향이 주기적으로 변화함에 따라 공기보다 가벼운 암모니아 가스는 대기안정도, 풍향, 풍속 등에 영향을 받아 주변 지역 사방의 식물체에 피해를 끼친 것으로 추정된다.

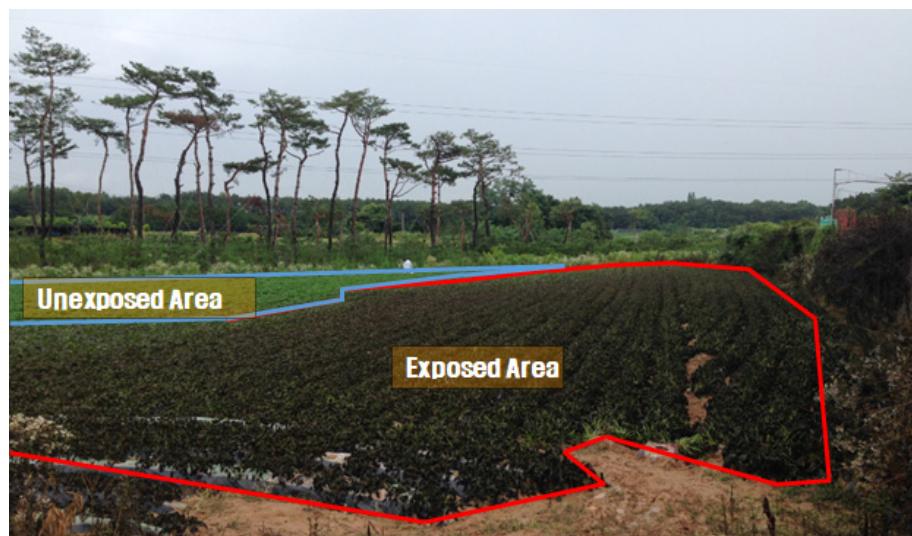


Fig. 4. Visible exposure area of sweet potato field in surrounding ammonia spill.

한편, 사고 지점으로부터 가시적 노출 피해 범위는 67 m 내외로 확인되었지만, Fig. 2 및 Table 5에서 나타난 시나리오 영향 범위 결과와 비교하면 다소 큰 차이를 보였다. 이러한 차이를 보인 결과는 누출된 암모니아 특성에 기인한 것으로 추정되는데, 암모니아는 공기보다 가벼워 대기 중에 노출되면 기체 상태로 빠르게 확산하는 경향이 있지만, 확산거리가 멀어질수록 공기 등과 혼합되어 암모니아의 농도는 점점 낮아지기 때문에 식물체 피해 여부는 가시적으로 확인되지 않는다. 따라서 OCA 평가에 의해 추정된 피해 범위를 확인하기 위해서는 가시적 피해 영역과 더불어 가시적으로 확인되지 않은 구역에 대한 식물체 등의 잔류오염도를 추가로 실시하여 실제 확산거리에 대한 중점적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

사고지역 농작물의 암모늄 함량

가시적 피해범위에 따른 사고지역 식물체의 암모니아 잔류 여부를 추정하기 위해 채취한 고구마 잎의 암모늄 함량을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. 가시적으로 노출 피해를 입은 고구마 잎(CSP1~2, RSP1~2, LSP1~2)의 암모늄 함량은 69.6~218.0 mg/kg 범위로

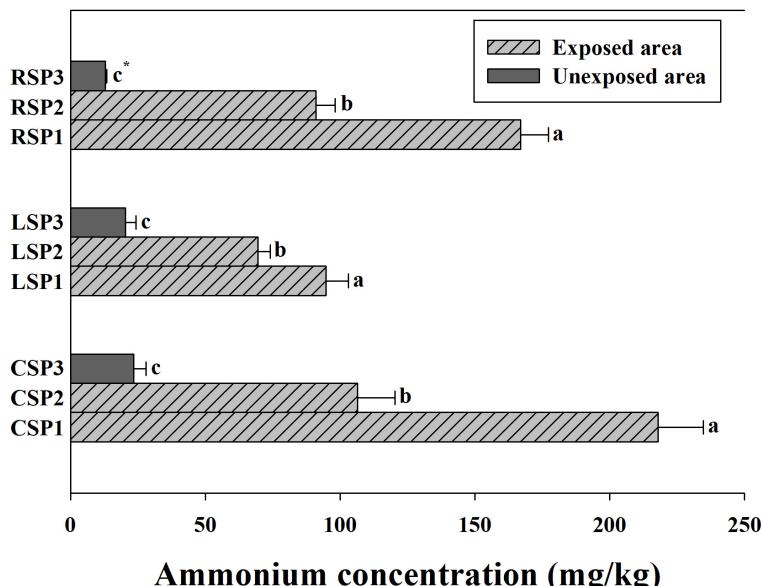


Fig. 5. Ammonium concentration in sweetpotato from exposed and unexposed area.

*Means with the same letter superscript in histograms are not significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test.

가시적 노출 피해가 발생하지 않은 지점(CSP3, RSP3, LSP3)보다 최대 16.9배 높게 나타나는 경향이었다. 특히, 사고 취급설비 경계 바로 옆에 위치한 CSP1 지점이 218.0 mg/kg로 가장 높게 나타났고, 사고 당일 풍향, 우수 등의 기후 조건과 밭 고랑, 지면의 경사도 등의 물리적 조건 영향을 받아 남동쪽 방향의 RSP1 및 RSP2 지점의 암모늄 함량이 상대적으로 높은 경향이었다. 아울러, 전체적으로 사고 지점에서 멀어질수록 고구마 잎의 암모늄 함량은 점차 감소하는 경향이었다($p<0.05$).

사고 지점 주변에 자생하는 식물체의 암모니아 잔류 여부를 추정하기 위해 가시적으로 노출 피해를 입은 쑥(WW1~3)과 가시적 노출 피해가 발생하지 않은 지점의 쑥(WW4~9)을 채취하여 암모늄 함량을 조사한 결과는 Fig. 6과 같다. 노출 지역 쑥의 암모늄 함량은 178.7~200.8 mg/kg 범위로 노출 지역의 고구마 잎 암모늄 함량과 유사하게 식물체 내 암모늄 잔류 여부를 확인할 수 있었다. 한편, Fig. 2의 시나리오 영향 범위 결과를 반영하여 최악의 사고시나리오(1.6~1.8 km) 내 자생하는 쑥(WW7~9)과 대안의 사고시나리오(600~800 m) 내 자생하는 쑥(WW4~6)을 채취하여 암모늄 함량을 조사한 결과(Fig. 6), 각각 49.0~67.8 mg/kg, 62.2~77.8 mg/kg 범위로 가시적 노출 지점의 쑥보다 낮은 경향이었지만, 대체적으로 식물체 고유의 기본적인 암모늄 함량을 가진 것으로 나타났다. 이러한 원인은 Choi 등[14]과 Lee 등[12]의 결과에서 확인할 수 있는데, 식물이 흡수하는 총 무기원소 중 가장 많은 부분이 질소이며, 암모늄 및 질산태 질소 비율에 따라 식물 생육에 영향을 미치고, 질소 시비 또는 흡수량에 따라 식물체별로 차이를 나타낸다고 보고한 바 있어, 본 연구의 결과 역시 주변 지역의 경작지에서 발생되는 질소원의 영향, 토양 미생물과 같은 주변 환경요인에 의해 발생되는 암모니아 가스, 각 식물체의 생육 특성 및 질소 동화작용 등에 의해 식물체 고유가 가지고 있는 질소가 영향을 미친 것으로 추정된다.

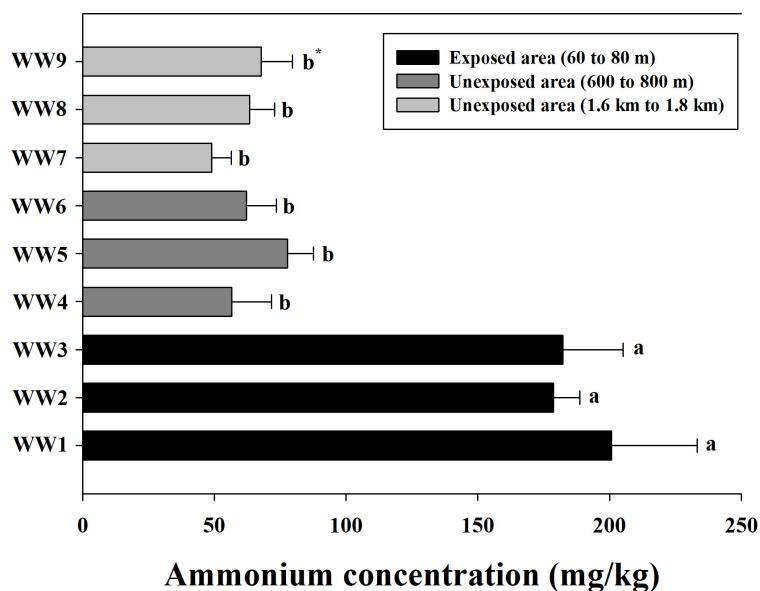


Fig. 6. Ammonium concentration in wormwood from exposed and unexposed area.

*Means with the same letter superscript in histograms are not significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test.

앞서 실제 사고 발생에 의해 일어날 수 있는 대안의 사고시나리오 영향 범위 결과와 식물체의 잔류 성분 측정 결과를 비교한 결과, 예측 영향 범위 값인 600 m 이상을 넘어서도 쑥의 암모늄 함량이 49 mg/kg 이상 존재하여 암모늄 잔류 여부를 확인할 수 있었지만, 식물체 고유가 가지고 있는 암모늄 이온과 질소비료의 시비, 주변 환경요인에 의해 변화할 수 있는 질소원을 고려할 때 실제 오염 지역으로 추정하기에는 무리가 있다. 하지만, OCA 평가와 잔류 오염도 측정 결과 비교를 통해 주변 환경의 초기 오염 여부를 판단하는 지표로 활용 가능하고, 식물체별 질소, 암모늄 이온, 암모니아 함량 등 기초 성분 자료를 바탕으로 암모니아의 오염 정도를 추정하는 좌표로 활용될 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구와 같은 사례연구를 지속적으로 수행하여 기초자료를 축적하고, 나아가 실제 사고 피해 영향 범위를 판단하는 기준을 마련하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

Data Availability: All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

Author Contributions: J.-Y.K. conceived and designed the research; Y.L. led the exposure experiment; Y.L. and J.-Y.K. wrote the first manuscript, revised the manuscript, led the field investigation, performed the ion chromatography analysis, prepared the sample; G.N. and H.Y. performed the off-site consequence analysis; G.N. and J.-Y.K. performed the statistical analysis; H.Y. and B.K. collected the data; C.S. provide critical feedback.

Notes: The authors declare no conflict of interest.

Additional Information:

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.01>
Correspondence and requests for materials should be addressed to Jae-Young Kim.

Peer review information Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Reprints and permissions information is available at <http://www.korseaj.org>

References

1. Lee JC, Jeon BH, Kim HS (2022) A study on the improvement of the system to reduce damage on ammonia chemical accident. Journal of the Society of Disaster Information, 18, 306-313. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2022.6.30.306>.
2. Park S, Jung S (2016) Recommended evacuation distance for offsite risk assessment of ammonia release scenarios. Journal of the Korean Society of Safety, 31, 156-161. <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.3.156>.
3. Huh YJ, Leem SH (2014) A study on the estimation of damage by leaking of NH₃ and Cl₂ applied to LPCVD. Journal of the Korean Institute of Gas, 18, 1-5. <https://doi.org/10.7842/kigas.2014.18.5.1>.
4. Kang SJ, Lee IM, Moon JY, Chon YW (2017) Risk analysis of ammonia leak in the refrigeration manufacturing facilities. Journal of the Korean Institute of Gas, 21, 43-51. <https://doi.org/10.7842/kigas.2017.21.1.43>.
5. Ryu YJ, Lee MK, Lee SK (2016) Measures to prevent recurrence through the analysis of an explosion case at ammonia refrigeration facilities. Journal of the Korean Institute of Gas, 20, 38-45. <https://doi.org/10.7842/kigas.2016.20.3.38>.
6. Kim HS, Jeon BH, Lee MJ, Yun JH, Lee HS, Jung WY, Jo JA (2020) A study on development of damage impact distance calculation formula to determine evacuation and notification of residents in case of ammonia release accident. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 21, 308-316. <https://doi.org/10.5762/kais.2020.21.10.308>.
7. Lim H, Kwak S, Jung J, Ryu T, Choi W, Lee J, Lee J, Lee Y, Kim J, Yoon J, Ryu J (2018) A Study on the factors affecting the influence ranges of ammonia leakage by using KORA program. Journal of the Korean Institute of Gas, 22, 38-44. <https://doi.org/10.7842/kigas.2018.22.3.38>.
8. Jeong SY, Park HK, Lee MC (2023) Accident impact assessment using the ALOHA program for the application of hydrogen and ammonia as fuels of a combined cycle power plant. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 47, 647-661. <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2023.47.12.647>.
9. Kim JY, Lee E, Lee MJ (2019) Environmental damage to nearby crops by hydrogen fluoride accident. Korean Journal of Environmental Agriculture, 38, 54-60. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2019.38.1.2>.
10. Hanna S, Dharmavaram S, Zhang J, Sykes I, Witlox H, Khajehnajafi S, Koslan K (2008) Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three recent chlorine railcar accidents. Process Safety Progress, 27, 248-259. <https://doi.org/10.1002/prs.10257>.
11. Park YK, Kim TO (2015) Evaluation of ammonia gas release in the solar cell manufacturing process using the ALOHA model. Journal of Odor and Indoor Environment, 14, 136- 149. <https://doi.org/10.15250/joie.2015.14.2.136>.
12. Lee YR, Jeong SJ, Lee DS (2011) Injury symptoms of some orchids by ammonia gases. Journal of People, Plants, and Environment, 14, 363-367.
13. Park JS, Kim JY, Kim MO, Park HW, Chung HM, Choi JW (2017) Evaluation of exposure indicators for plants by silicon tetrachloride release. Korean Journal of Environmental Agriculture, 36, 288-292. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2017.36.4.37>.
14. Choi JM, Jeong SK, Ko KD (2008) Influence of NH₄:NO₃ ratios in fertigation solution on appearance of ammonium toxicity, growth and nutrient uptake of 'Maehyang' strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 26, 223-229.