

구미 불산 누출사고 지점 주변 식물의 불소화합물 농도 분포 및 공기 중 불화수소 농도 추정에 관한 연구

구슬기 · 최인자 · 김원 · 선옥남 · 김신범 · 이윤근[†]

원진재단부설 노동환경건강연구소

Study on the Distribution of Fluorides in Plants and the Estimation of Ambient Concentration of Hydrogen Fluoride Around the Area of the Accidental Release of Hydrogen Fluoride in Gumi

Seulgi Gu, Inja Choi, Won Kim, Oknam Sun, Shinbum Kim, and Yungeun Lee[†]

Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health

ABSTRACT

Objectives: The goal of this study is to identify the distribution of the foliar fluorine content of vegetation surrounding the area where hydrofluoric acid was accidentally released in Gumi, Gyeongsangbuk-do on September 27, 2012. In addition, it also aims to estimate the concentration of hydrogen fluoride in the air on the day of the accident.

Methods: Samples of plant leaves were collected on October 7, 2012 within 1 km from the site where the accident occurred. These samples were analyzed for soluble fluorine ion with an ion selective electrode. The ambient concentration of hydrogen fluoride was calculated using the fluoride content in the plant via the dose-rate equation ($\Delta F=KCT$).

Results: The arithmetic and geometric means of the concentrations were 2158.2 and 1183.7 mg F kg⁻¹ for leaves and, 2.4 and 1.1 ppm HF for the air, respectively. The highest concentration of hydrogen fluoride in the air was 14.7 ppm, which is higher than the maximum concentration reported by the government (1 ppm) and the exposure limit (ceiling, 3 ppm). The concentrations of both fluorine and hydrogen fluoride decreased with increasing distance from the accident site and showed a significant decrease outside of a 500 m radius from the site ($p < 0.05$).

Conclusions: The area around the accident site was highly polluted with hydrogen fluoride according to the results of this study. Considering the persistency of hydrogen fluoride in the environment, long-term monitoring and environmental impact assessment should be pursued.

Keywords: Chemical accidental release, Gumi, hydrogen fluoride

I. 서 론

2012년 9월 27일 15시 34분, 경북 구미시 4공단
에 위치한 '휴브글로벌'이라는 화학물질 제조업체에
서 다량의 불산이 누출되는 사고가 발생하였다. 20

톤 용량의 탱크에서 공기 중으로 누출된 불산은 불
화가스로 기화되어 순식간에 주변 공단 및 인근마을
을 오염시켰다. 누출은 8시간 동안 지속되었고 총
누출량은 8-12 톤으로 추정된다. 사고 지점 반경 약
50 m 이내의 주민들은 사고 발생 후 36분이 지나 대

[†]Corresponding author: Myeonmok 3-dong, Jungnang-gu. Wonjin Greenhospital, Seoul, 313-831, Korea, Tel: +82-2-490-2088, Fax: +82-2-490-2099, E-mail: lyk4140@hanmail.net

Received: 20 March 2013, Revised: 18 June 2013, Accepted: 19 July 2013

피를 시작하였고, 4시간 46분 후에는 사고 지점으로 부터 반경 1.3 km 이내의 모든 주민들을 대상으로 대피령이 내려졌다.¹⁾

이 사고로 인해 사고 현장에서 5명의 노동자가 사망했으며, 인근 주민 및 작업자 등 총 18명이 입원 치료를 받았고, 총 12243명이 병원 진료를 받았다. 또한 사고 주변 1 km 이내의 농작물을 포함한 거의 모든 식물이 고사하여 농작물 및 가축 등 재산 상의 막대한 피해를 초래하였다(보상 책정 금액 380억 원).^{1,2)}

1987년 텍사스에서 발생한 불산 누출 사고의 경우 사고 발생 20분 후 사고 지점 반경 0.8 km 내의 3 천 명이 대피하였다. 사고 발생 1시간 후 측정된 대기 중 불화수소 농도는 10 ppm이었고, 939명이 병원 치료를 받았던 사례가 있다.

이번 사고의 원인 물질인 불산은 주로 냉매제인 탄화불소(fluorocarbon), 고옥탄가의 가솔린, 플라스틱, 항공기 부품 및 반도체의 제조에 사용되어 왔다. 그 외에도 알루미늄 제련소, 인산 비료공장, 유리나 벽돌 및 타일 가공 산업 혹은 플라스틱 공장 등에서 석탄, 광물, 점토와 같이 불소가 함유되어있는 물질을 고온으로 가열하면 부산물로 불화수소가 발생한다.³⁾ 이와 같이 대기를 통한 불화수소 화합물의 배출로 인해 주변 환경이 얼마나 오염되었는지를 평가하기 위해서 기존에는 식물이나 토양 분석을 통한 연구들이 진행되어왔다.^{4,7)}

불산 용액이 공기 중으로 누출될 경우 기온과 기압에 따라 차이가 있을 수 있지만, 19.5°C 이상에서는 불화수소로 기화하여 공기 중으로 급속하게 확산된다. 대기 중 불화수소는 수증기에 흡수되어 불산의 형태로 대부분 지표면으로 낙하하며, 잔류 시간이 짧아 반감기에 대한 정보가 없다. 그러므로 정확한 노출 평가를 위해서는 공기 중 농도의 측정이 우선적으로 이루어져야 한다.³⁾

이외에도 불소는 식물체에 축적되거나 식물 상부에 먼지 형태로 침적된다.³⁾ 식물의 기공을 통해 흡수되는 가스상의 불소는 습도나 강수, 낮의 길이(day length), 기온의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 식물 내 불소화합물의 농도 분석 방법으로는 적정법, 분광 광도법, 전위차 측정법이 주로 사용된다.⁹⁾ 본 연구 분석방법으로 적용된 ISE를 이용한 전위차 측정 분석방법의 검출한계는 0.05 µg/g, 회수율은 95%

이상으로 알려져 있다.³⁾

인체가 불화수소에 노출될 경우에는 부식성이 강한 특성 때문에 일차적인 급성 영향으로 피부 및 안구의 자극이나 화상, 기관지 췌양, 폐부종이 발생하거나 사망에 이를 수 있다.^{3,10,11)} 이차적으로는 만성 노출로 인한 불소 침착증(fluorosis) 등의 건강 영향이 나타날 수 있다.^{3,10,12)} 불화수소가 체내에 유입된 경우, 수 시간 내에 나타나는 급성영향이 크며, 소변을 통해 대부분의 양이 24시간 이내에 배출된다. 그러므로 급성 노출 평가를 위해서는 사고 발생 후 24시간 이내에 생체시료를 분석하는 것이 중요하다.^{3,13)}

구미 불산 누출 사고 발생 시 정부에서는 사건 당시의 상황 파악을 위해 사고 발생 익일부터 환경오염도 실태조사를 실시하였다. 환경부에서는 사고 발생 1일 후 사고지점 및 거주지역에서 검지관으로 측정된 대기 중 불화수소가 불검출 되었다는 보도자료를 발표하였고, 주민들은 자료의 정확도와 신뢰성에 대해 이의를 제기하였다.^{1,14)}

그러므로 본 연구에서는 불산 누출 사고 피해지역의 식물을 대상으로 불소 농도를 분석하여 주변 환경의 오염 수준을 평가하고, 이를 통해 사고 당시의 공기 중 불화수소 농도 수준을 추정하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구 대상

사고 발생 10일 후(2012년 10월 7일) 공기 중 불화수소 농도 추정을 위해 사고 지역 주변과 농작물 피해지역을 대상으로 식물 시료를 채취하였다. 쌀과 멜론 등을 포함한 식용작물 10종과 소나무 등이 포함된 식물 3종을 포함하여, 총 13종을 대상으로 24 개의 시료를 채취하였다. 공장지역의 경우에는 접근이 제한되어 대상에 포함되지 않았다.

2. 측정방법

시료 채취는 사고 발생 지점부터 반경 1 km 이내에 위치한 피해 식물의 잎을 대상으로 하였다. 식물의 불화수소 흡수는 주로 기공을 통해 이루어지므로 버를 제외한 모든 종은 식물의 잎을 채취하는 것을 원칙으로 하였다. 시료 채취는 미국 유독물질 질병 등록청 (Agency for Toxic Substances and Disease

Registry, ATSDR)에서 제시한 Jacobson & Heller의 방법을 참조하였다.³⁾

사고 지점으로부터 거리에 따른 농도 분포를 확인하기 위해 바람의 방향에 따라 이동하면서 거리를 측정하고 해당 위치에서 고사된 식물을 채취하였다. 사고 발생 지점으로부터 동일한 거리에 있는 식물 잎의 채취 시, 대상 식물 중의 균락은 사고 당시 균일한 공기 중 농도의 불화수소에 노출된 것으로 가정하였다. 따라서 채취 대상으로 동일 식물 중의 균락 중 접근 가능한 임의의 수목을 선정하여 잎이 난 가장 낮은 곳, 중간 지점, 높은 지점까지 총 3곳에서 채취하였다. 채취 용기는 멸균된 50 mL conical tube (polypropylene, Becton Dickinson, USA)를 사용하였다.

3. 분석 방법

본 연구에서의 식물 중 잔류 불소 농도는 불소 이온(soluble F)을 분석한 값이다. 시료의 전처리 및 분석은 Jacobson & Heller의 방법을 참조하였다.¹⁵⁾ 전처리를 위해 습기 등으로 젖어 있는 식물 시료는 일차적으로 상온에서 24시간 이상 자연 건조시킨 후에 70°C 오븐에서 24시간 동안 건조시켰다. 건조시킨 식물은 막대사발을 이용하여 잘게 부수거나 가위를 이용하여 가능한 한 작게 자른 다음, 스테인리스 스틸 재질의 20 mesh 표준체(Chung Gye Sang Gong SA, Korea)를 통과시켜 분석용 시료로 이용하였다.

분석용 시료는 0.5 g을 취하여 50 mL 시험관에 옮긴 다음, 0.05 M H₂SO₄(ACS grade, Sigma-Aldrich, Germany) 10 mL를 첨가하였다. 시험관의 시료는 흔들어서 혼합시킨 다음 15분 동안 shaker(SK-300, JEIO Tech)에서 추출한 후에, 다시 0.01 M NaOH (SAMCHUN Pure chemical, Japan) 10 mL를 첨가한 다음 동일한 처리를 하였다.

불소 이온은 이온전극측정기(Orion Star A214, Thermo Scientific)로 측정하였다. 이온전극측정기는 1~10 ppm 또는 10~100 ppm의 불소 표준용액(Fluoride with TISAB II Standard, Thermo Scientific)으로 보정하였다. 검량선 작성은 10배 차이가 나는 2개의 표준용액을 이용하여 전위(mV)를 측정하여 기울기(slope)가 -50~-60 mV/dec 범위 안에 들어오도록 하였다. 그리고 시료는 추출용액 2 mL에 동일한

Table 1. Accumulation coefficient (K) of fluoride for plant species sampled

Sampled plant	Species	K* (m ³ /(mg·day))	Reference
Pine	Pinus	0.24	Horntvedt ¹⁶
Fir	Abies	0.31	Horntvedt ¹⁶
Rice	Oryza	0.78	Vike ⁸ , Sylvester ²³
Plum	Prunus	0.99	Horntvedt ¹⁶
Persimmon	Diospyros	1.07	Vike ⁸ , McKenny ²⁴
Ginkgo	Ginkgo	1.07	Vike ⁸ , Raman ²⁵
Jujube	Zizyphus	1.07	Vike ⁸ , Christie ²⁶
Chilli pepper	Capsicum	1.14	Vike ⁸ , Nwachukwu ²⁷
Perilla	Perilla	2.23	Vike ⁸ , Koji ²⁸
Radish	Raphanus	2.23	Vike ⁸ , SEWPac ²⁹
Soybean	Glycine	2.23	Vike ⁸
Grape	Vitis	2.50	Doley ²²
Melon	Cucumis	2.50	Vike ⁸ , Paris ³⁰ , Kortekamp ³¹

* K value is the accumulation coefficient of fluoride in plant

양의 이온강도 조정 완충용액(total ion strength adjustment buffer, TISAB, Thermo Scientific)을 첨가하여 혼합한 다음 불소 이온을 측정하였다. 분석에 사용한 이온전극측정기의 검출한계는 0.02 ppm이었으며, 시료 중 일부를 반복 분석한 결과 변이계수 (CV)는 5% 미만이었다.

사건 당시의 공기 중 불화수소 농도는 강수, 일구조 및 여러 요인을 고려하여 용량-비율 관계식(dose-rate equation)으로 추정하였다. Committee on Biological Effects of Atmospheric Pollutants에서 제안한 식은 식 1과 같다.⁸⁾ Vike나 Horntvedt의 연구에서 제시된 축적계수 (K) 값에 대한 식물 종과 본 연구 대상의 식물 종이 다른 경우, 잎의 특성에 따라 Vike에서 제시한 K값을 적용하였다(Table 1).^{8,16)}

관계식에는 축적계수(K)와 분석한 식물 중의 불소 농도(F)를, 노출시간(T)에는 1일을 대입하여 공기 중 농도(C)를 계산하였다. 노출시간(T)은 탱크 밸브가 열린 채로 8시간 동안 누출되었으므로, 하루 동안 개방된 형태로 식물에 노출되었다는 것을 가정하여 1일로 산정하였다. 최종 공기 중 농도는 ppm으로 계산하였으며, 불화수소 분자량은 20.01, 온도는 사건 당일 평균 기온인 18.3°C를 적용하였다.^{3,17)}

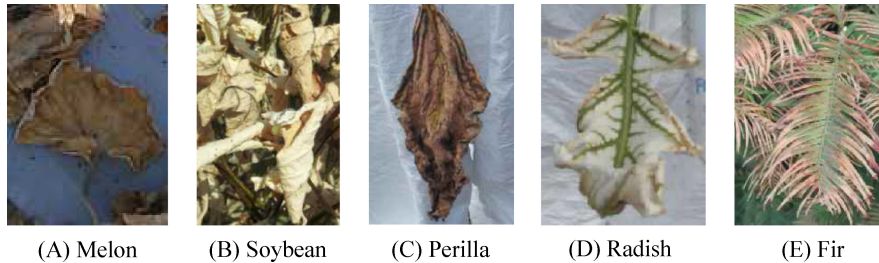


Fig. 1. Necrotic foliage of some vegetation samples.

$$\Delta F = KCT \quad (\text{식 } 1)$$

F, fluoride content in the plant (mg/kg dry weight)
K, accumulation coefficient (m³/μg · day)
C, concentration of fluoride in the air (μg/m³)
T, period of exposure (day)

통계 분석으로는 거리에 따른 불소와 불화수소의 농도 추이를 확인하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 특정 거리 범위 간의 불소 및 불화수소 농도의 통계적 차이 검정에는 Wilcoxon rank sum test를 실시하였다. 유의수준은 0.05 미만으로 하였으며, 분석에는 R(ver.2.15.2. for Windows)를 이용하였다.

III. 연구 결과

사고 주변 지역의 오염 정도 평가와 사고 당시 공기 중 불화수소 농도를 추정하기 위해 채취된 식물의 잎은 전체 혹은 부분적으로 고사된 상태였다(Fig. 1). 총 24개의 시료에 대한 식물 중 불소 이온 농도의 산술평균과 기하평균은 각각 2158.2, 1183.7 mg/kg이었다. 식물 중 불소 농도의 최소값과 최대값의 차이는 9458.2 mg/kg이었다. 식물 시료의 불소 농도를 통해 계산한 공기 중 불화수소 추정 농도의 산술평균과 기하평균은 각각 2.4, 1.1 ppm이었다. 공기 중 불화수소 추정 농도의 최대값과 최소값은 14.5 ppm의 차이를 보였다(Table 2).

사고 지점으로부터 1 km 범위에서 채취한 식물 시료는 500 m 지점을 기준으로 평균 불소 농도 간에 유의한 차이가 발생하였다(*p* < 0.05). 식물의 불소 농도와 축적 계수를 이용하여 구한 공기 중 불화수소 추정 농도 또한 500 m 미만 지역과 500 m 이상의 지역 간에 통계적으로 유의한 차이가 있었다

Table 2. Concentrations of fluoride in leaves (mg/kg dry wt.) and estimated ambient hydrogen fluoride (ppm)

Distance (m)	N		AM	GM	Min	Max
< 500	17	F*	2847.8	1982.4	292.1	9594.1
		HF†	3.1	1.6	0.4	14.7
≥ 500	7	F*	483.5	338.3	135.9	1252.5
		HF†	0.7	0.5	0.2	2.4

* The concentration of fluorine in sampled leaves

† The estimated concentration of hydrogen fluoride in the air at the accident

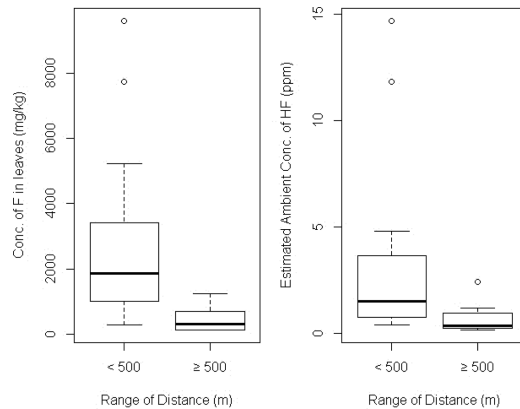


Fig. 2. Concentration of fluorine and hydrogen fluoride by range of distance.

(*p* < 0.05)(Fig. 2).

식물의 불소 농도와 공기 중 불화수소 추정 농도는 거리에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 사고지점 200 m 이내에서 공기 중 불화수소 농도 차이가 크게 나타난 것은 사고가 발생한 공장 바로 앞 논의 벼와 멜론 앞에서 추정된 값이다(Fig 3). 불소이온 농도가 가장 높았던 벼의 경우 개방된 공

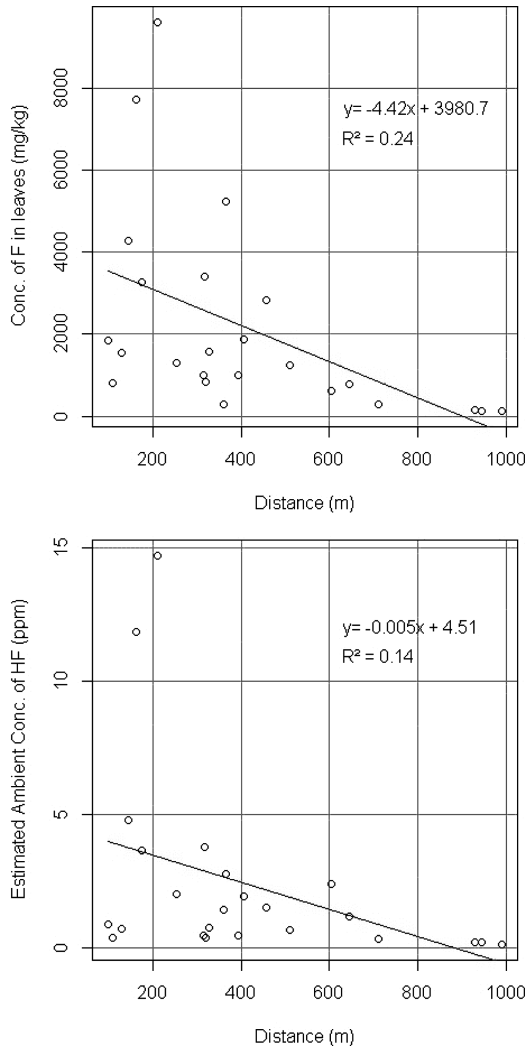


Fig. 3. Concentration of fluorine and hydrogen fluoride by distance.

간에서 불화수소에 노출되어 최대 9594.10 mg/kg으로 나타났으며, 이로부터 추정된 공기 중 불화수소 농도는 14.69 ppm이었다. 사고지역 바로 앞에 위치하였으나 농도가 낮게 추정된 멜론 앞의 경우 비닐 하우스 작물이기 때문에 벼처럼 완전 개방된 형태로 노출된 것은 아니었다. 이 멜론 앞 시료의 경우 3개 시료(804.83, 1535.35, 1852.55 mg F/kg)에서 평균 0.67 ppm 수준의 불화수소 농도가 추정되어, 벼에서 추정된 공기 중 농도보다 14.02 ppm 낮게 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 2012년 9월 발생한 구미지역 불산 저장탱크 폭발 사고에 대한 상황을 추정하고, 식물의 잔류 불소 농도 분석을 통해 신뢰성 문제가 대두되었던 공기 중 불화수소의 농도 수준을 파악하고자 하였다. 본 연구진은 사건이 발생일부터 10일이 경과한 후 현장을 직접 방문하여, 사건 당시 공기 중 농도 추정을 위해 피해 지역의 반경 1 km 이내에서 식물 시료를 채취하였다.

시료를 분석한 결과, 식물 중 불소 이온 농도는 135.9 - 9594.1 mg/kg dry wt.로 일반 환경에서 자란 식물의 불소 함량인 2 - 20 mg/kg에 비해 매우 높은 것으로 확인되었다.³⁾ 한편, Krelowska-Kulas 등이 철강 공장 주변 지역의 1.5 km 이내 거리에서 식물의 불소 함량을 조사한 결과인 0.54 - 8.82 mg/kg와 비교하여도 높은 수준인 것으로 나타났다.¹⁸⁾

불소의 오염원으로 알려져 있는 알루미늄 제련소 인근에서 실시한 연구에서는 식물의 앞에서 최대 500 mg/kg의 불소가 검출되었다.⁸⁾ Haidouti의 연구에서는 알루미늄 제련소 인근에서 환경피해를 입은 식물과 대조군을 비교한 결과 피해 지역에서는 257.2 - 621.2 mg/kg, 대조군에서는 8.2 - 15.4 mg/kg 수준으로 나타나, 오염지역의 불소 농도가 훨씬 높은 것이 확인되었다.⁵⁾ 본 연구에서 채취한 식물 시료의 평균 불소 농도는 기존 불소 오염원 인근 지역의 연구 결과와 비교하였을 때 최대 244배 높은 농도 수준을 보였다(Table 2).

피해 지역의 식물 시료의 분석 결과를 바탕으로 사고 당시 공기 중 불화수소 농도를 추정한 결과, 평균은 2.4 ppm으로 최소 0.2 ppm에서 최대 14.7 ppm까지 확인되었다. 평균 농도 값은 알루미늄 제련소 주변의 불화수소 오염지역의 대기 중에서 확인된 0.003 ppm의 800 배에 달하는 수준이었다.⁸⁾

미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 노출기준서(The shold Limit Values Documents, TLVs Documents)에 따르면 불화수소에 대한 직업적 노출 기준 중 한 순간도 노출되면 안 되는 수준인 천장 값(Ceiling, C)으로 2 ppm이 설정되어 있다. 이는 일차적으로 자극 독성을 예방하기 위해 설정된 기준이다.¹⁹⁾ 고용노동부의 불화수소 노출 기준은 8시간 가

중평균(Time Weighted Average, TWA)과 천장값에 대해 각각 0.5, 3.0 ppm으로 정해져 있다.²⁰⁾

본 연구 결과에 따르면, 사건 당일 공기 중 불화수소의 산술 평균 농도는 고용노동부의 TWA와 천장값, ACGIH의 TLV와 비교하였을 때 각각 482.1, 80.3, 120.5% 수준으로 초과되었다고 추정된다. 그리고 사고발생지점 500 m 미만에서의 추정된 공기 중 불화수소의 평균 농도는 노동부의 천장값인 3 ppm을 초과하였으며, 500 m를 초과한 지점에 비해 통계적으로 유의하게 높았다.

미국산업안전보건연구원(US National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 고농도의 유해가스에 노출되어 피해자가 정신을 잃거나 사망을 일으켜 영구적인 건강 장애를 유발할 수 있는 오염물질에 대한 기준인 IDLH(Immediately Dangerous to Life or Health)을 30 ppm으로 정하고 있다. 공기 중 불화수소 농도 추정 시 과대평가를 최소화 하기 위하여 높은 K값을 적용하였음에도 불구하고 최대값이 IDHL의 50%에 인접했다는 것은 당시 상황의 위험성을 예측하게 하는 결과이다.

분석 결과 중 사고지점으로부터 150 m 이내에 있는 식물 중의 불소 농도나 공기 중 불화수소 농도가 인접 거리의 다른 관측치에 비해 낮은 경우가 있다. 이 경우에는 측면의 일부만 개방된 비닐하우스에서 재배되었기 때문에 전면 개방된 노출 지역에 비해 거리는 가까웠지만 농도가 낮게 검출된 것으로 판단된다. 이를 고려한다면, 공기 중 불화수소의 농도는 본 연구의 평균값보다 높았을 가능성을 배제할 수 없다.

본 연구의 제한점으로는 사고 발생 후 측정일까지의 공백 시간과 시료 수, 농도 추정 식 등을 고려해 볼 수 있다. 사고 발생일부터 조사일까지 우천 영향은 없었더라도 시간이 지나면서 식물 앞에 축적된 불소의 함량은 변화했을 가능성이 있다. 그러나 식물에 축적된 불소는 불화수소의 노출이 중단된 후 휘발(volatilization)되어 농도가 50% 정도까지 감소되거나 10일 이내에서는 유의한 농도차이가 발생하지 않았다는 선행 연구 결과를 고려했을 때, 본 연구에서 측정된 식물 중 불소 농도와 대기 중 불화수소 농도는 실제 값과 유사하거나 과소평가 되었을 수 있다.^{21,22)}

용량-비율 관계식에서는 채취한 식물 중에 대한 축

적계수 값이 없는 경우, 종의 유사성에 따라 K의 최대값을 적용하여 과대평가되지 않도록 하였고, 때문에 추정된 공기 중 불화수소의 농도보다 더 높은 수준에서 노출이 발생했을 수 있다.

그리고 조사 당시 사태의 긴급함으로 인해 동일 식물 종의 잔류 불소 농도 분석을 위한 충분한 시료 수 확보가 용이하지 못했다는 제한점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 사고 지역을 주기적으로 조사하여 오염 수준의 추이를 파악하기 위한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

이처럼 사고 당시 대기 중의 불화수소의 농도가 매우 높았을 것으로 예측되는 반면 관련 당국에서는 초기 대처가 미흡하여 피해 규모를 최소화 하는데 실패했다. 텍사스 불산 누출사고의 경우 20분 이내에 대피령이 발령되었고 최종적으로는 사고 지점 8 km² 이내의 3천 여명의 주민들이 대피하였다.¹⁰⁾ 반면 구미 사고의 경우 4시간 36분이 지난 뒤에서야 반경 1.3 km 이내 주민들을 대상으로 대피령이 발령되었으며, 정확한 오염도 평가 없이 12시간 만에 위기 정보가 해제되었다.

그러므로 구미 불산 사고와 같이 환경과 인명 피해가 발생 가능한 경우에 대비하기 위해서는 사고 초기 대응책으로 사고 발생 후의 신속한 환경 모니터링과 생체시료 수집 및 건강영향 평가를 위한 방안이 마련되어야 할 것이다. 그리고 본 연구 결과를 토대로, 사고 직후 초기 대응이 이루어지지 않았을 경우에는 후향적 방법으로 식물을 이용하여 사고 당시의 대기 중 농도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구의 연구진은 2012년 경북 구미에서 발생한 불산 탱크 폭발 사고로 인한 환경오염 수준을 파악하고, 당시의 불화수소 농도를 추정하고자 현장을 방문하여 조사를 실시하였다. 사고 발생지점 반경 1 km 내에서 식물을 채취하여 분석한 결과, 불화수소 오염원의 인근 지역에 비하여 최대 200배 이상 높은 것으로 추정되었다.

공기 중 불화수소의 농도는 과대평가를 방지하기 위해 보수적으로 추산하였음에도 불구하고 평균 농도가 직업적 노출기준에 비해 최대 4배 이상, 최대 농도가 IDHL의 50%에 달하는 것이 확인되면서 사

고 당시의 심각성을 시사하고 있다. 본 연구 결과를 기반으로, 사고 당시 환경 오염과 주민들의 노출 피해가 심각한 상태이었음을 추정할 수 있었다. 차후에는 불소가 환경 중에 잔류하는 특성을 고려하여 사고 지역의 장기적인 모니터링과 환경영향평가가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Lee YG. Workshop report on the problems and action strategy on recent chemical accident release: Cases of Samsung Electronics and Gumi - Reform required to secure the right to know for the residents. Seoul: Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health, 2013.
2. Park TJ. Gumi confirms 55.4 billion won compensation fund for hydrofluoric acid release. Kyongbukilbo. 6 March, 2013.
3. ATSDR. Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, and fluorine. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2003.
4. Arnesen AKM, Abrahamson G, Sandvik G, Krogstad T. Aluminium-smelters and fluoride pollution of soil and soil solution in Norway. *Sci Total Environ.* 1995; 163(1-3): 39-53.
5. Haidouti C, Chronopoulou A, Chronopoulos J. Effects of fluoride emissions from industry on the fluoride concentration of soils and vegetation. *Biochem Syst Ecol.* 1993; 21(2): 195-208.
6. Franzaring J, Klumpp A, Fangmeier A. Active biomonitoring of airborne fluoride near an HF producing factory using standardised grass cultures. *Atmos Environ.* 2007; 41(23): 4828-4840.
7. Koblar A, Tavèar G, Ponikvar-Svet M. Effects of airborne fluoride on soil and vegetation. *J Fluor Chem.* 2011; 132(10): 755-759.
8. Vike E. Uptake, deposition and wash off of fluoride and aluminium in plant foliage in the vicinity of an aluminium smelter in Norway. *Water Air Soil Pollut.* 2005; 160(1-4): 145-159.
9. Cooke JA, Johnson MS, Davison AW. Determination of fluoride in vegetation: A review of modern techniques. *Environmental Pollution (1970).* 1976; 11(4): 257-268.
10. Wing JS, Sanderson LM, Brender JD, Perrotta DM, Beauchamp RA. Acute health effects in a community after a release of hydrofluoric acid. *Arch Environ Health.* 1991; 46(3): 155-160.
11. Peters D, Miethchen R. Symptoms and treatment of hydrogen fluoride injuries. *J Fluor Chem.* 1996; 79(2): 161-165.
12. Erdal S, Buchanan SN. A quantitative look at fluorosis, fluoride exposure, and intake in children using a health risk assessment approach. *Environ Health Perspect.* 2005; 113(1): 111-117.
13. Carpenter R. Factors controlling the marine geochemistry of fluorine. *Geochim Cosmochim Acta.* 1969; 33(10): 1153-1167.
14. NIER. Report on the State of Environmental Pollution and Emergency Plan of Accidental Release of Hydrogen Fluoride in Gumi. Korea National Institute of Environmental Research, 2012.
15. Jacobson JS, Heller LI. A simple, rapid potentiometric method for the estimation of fluoride in vegetation. *Environmental Letters.* 1971; 1(1): 43-47.
16. Horntvedt R. Accumulation of airborne fluorides in forest trees and vegetation. *Eur J Forest Pathol.* 1997; 27(2): 73-82.
17. Surface Weather Observation Data. Korea Meteorological Administration. Available: http://www.kma.go.kr/weather/observation/past_cal.jsp?stn=279&yy=2012&mm=9&x=24&y=11&obs=12012 [accessed 3 May 2013]
18. Krelowska-Kulas M. Content of fluorine in vegetables and fruits from an industrial area. *Nahrung.* 1994; 38(4): 397-401.
19. ACGIH. 2012 TLVs and BEIs: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2012.
20. MOEL. Exposure Standard of Chemicals and Physical Parameters. *Notification of the Ministry of Employment and Labor.* 2012; 39-42.
21. Weinstein LH. Fluoride and plant life. *J Occup Environ Med.* 1977; 19(1): 49-78.
22. Doley D. Experimental analysis of fluoride susceptibility of grape vine (*Vitis Vinifera* L.): Foliar fluoride accumulation in relation to ambient concentration and wind speed. *New Phytol.* 1984; 96(3): 337-351.
23. Sylvester AW, Parker-Clark V, Murray GA. Leaf shape and anatomy as indicators of phase change in the grasses: comparison of maize, rice, and bluegrass. *Am J Bot.* 2001; 88(12): 2157-2167.
24. McKenney TC. Differentiation of sterile specimens of *Nyssa sylvatica* Marsh. and *Diospyros virginiana* L. *Castanea.* 1967; 186-189.
25. Raman A, M CJE. The anatomical features of powdered Ginkgo biloba L. leaf as observed by light microscopy. *J Med Food.* 1998; 1(2): 89-95.
26. Christie K, Currie M, Davis LS, Hill M-E, Neal S, Ayers T. Rhamnaceae Buckthorn family. *Canotia.*

- 2006; 2(1): 23-46.
27. Nwachukwu C, Mbagwu F, Onyeji A. Morphological and leaf epidermal features of *Capsicum annuum* and *Capsicum frutescens*. *Nature and Science*. 2007; 5(3): 54-60.
28. Tanaka K, Yu H-C, Kim YS. Cultivation of Perilla. Perilla: CRC Press; 1997. p.9-17.
29. SEWPaC. Wild radish: *Raphanus raphanistrum*. Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities, 2011.
30. Paris HS, Janick J, Daunay M-C. Medieval herbal iconography and lexicography of Cucumis (cucumber and melon, *Cucurbitaceae*) in the Occident, 1300-1458. *Ann Bot*. 2011; 108(3): 471-484.
31. Kortekamp A, Zyprian E. Leaf hairs as a basic protective barrier against downy mildew of grape. *J Phytopathol*. 1999; 147(7-8): 453-459.