

백두산 분화로 인한 상수도 시설 피해 관리 기준 설정 연구

최정렬¹ · 김민규^{2*} · 이경빈³ · 정일문²

¹(주)에스디엠이앤씨 기술연구소, ²한국건설기술연구원 국토보전연구본부, ³에스제이엠앤씨(주) 연구사업팀

An Study on Development of Water Systems Damage Management Standard Caused by Mt. Baekdu Eruption

Jung-Ryel Choi¹ · Min Gyu Kim^{2*} · Gyeng-Bin Lee³ · Il-Moon Chung²

¹Research and Development Team, SDM ENC Co., Ltd.

²Dept. of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Research and Business Team, SJMNC Co., Ltd.

Abstract

The purpose of this study is to establish the management standards of water systems in Korea. The damage factors of the water systems were classified by accumulation, adsorption, and abrasion. According to the thickness of volcanic ash, the management stage of the water systems was derived in four steps; VAD (Volcanic Ash Degree) I (0~1 mm), II (1~3 mm), III (3~5 mm), IV (over 5 mm). Finally, the management standards for water systems which consist of alarm levels, impacts of volcanic ashes, procedures and action plan to deal with the damage, are presented.

Keywords: Volcanic ash, Water systems damage management standard, Mt. Baekdu, VAD (Volcanic Ash Degree)

초 록

백두산 분화시 북풍 또는 북동풍이 발달하게 되면 국내에 화산재가 확산될 가능성이 있으며, 화산재에 의해 민감한 영향을 받는 상수도 시설의 관리기준이 필요하다. 본 연구에서는 국내 상수도 시설의 관리 기준 수립을 위해 국외의 다양한 화산에 대해 분야별 피해사례를 조사하였으며, 이를 바탕으로 상수도 시설의 피해 요인을 퇴적, 흡착/침착, 마모로 나누어 예상되는 피해 정도를 유형화하였다. 또한 위험평가 결과를 바탕으로 화산재 퇴적 두께에 따라 상수도 시설의 관리 단계를 4단계로 도출하였으며, 0~1 mm 은 VAD(Volcanic Ash Degree) I, 1~3 mm는 VAD II, 3~5 mm는 VAD III, 5 mm 이상은 VAD IV로 제시하였다. 최종적으로 도출된 관리 단계별 경보 기준, 화산재 영향, 피해 대응 절차 및 방안 등으로 구성된 상수도 시설 관리 기준(안)을 제시하였다.

주요어: 화산재, 상수도 관리 기준, 백두산, VAD (Volcanic Ash Degree)

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Min Gyu Kim
E-mail: kimmingyu@kict.re.kr

Received: 22 March, 2018

Revised: 31 May, 2018

Accepted: 4 June, 2018

© 2018 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

백두산은 과거 총 10여회의 분화 기록을 가지고 있으며(Yun and Lee, 2011), 분화 시 북풍 또는 북동풍이 발달하게 되면 국내에 화산재가 확산될 가능성이 있다(KMA, 2011).

화산재에 의해 영향을 받는 환경 분야 중 사회불안과 경제적인 혼란을 발생시킬 수 있는 가장 민감한 분야는 하천, 호소, 저수지 등 생활용수를 공급하는 수자원이며(MPSS, 2015), 지표수 위주의 수자원 이용률이 높은 국내의 경우 오염 발생 시 매우 큰 직·간접적 경제 피해가 예상된다(Jiang et al., 2013). 또한 우리나라 도시지역의 인구밀도는 매우 높은 수준으로 식수와 생활용수의 공급을 책임지는 수자원 공급 시설에 피해가 발생할 경우, 도시 지역에 사회적 혼란이 발생할 위험이 있다.

화산재는 단기간 동안 수체의 물리화학적 요소를 변화시키므로 양질의 용수 공급에 차질을 일으키는 것 외에, 화산재가 작은 조각의 암석과 화산유리로 구성되어 있기 때문에 취수 및 정수 시설의 프로세스(process) 이동 시 마모나 흡집을 일으켜 상수도 시설의 기계적 손실을 초래하기도 한다. 또한 화산재 세척에 필요한 용수의 급격한 증가는 용수 공급에 차질을 불러일으키게 되며, 상수원의 심각한 오염은 용수 공급 중단을 발생시킬 수 있다. 화산 분화와 화산재에 의한 상수도 시설의 피해를 감소시키기 위해서는 탁도와 산도가 증가하기 전에 상수도시스템을 폐쇄하거나, 정기적인 수질 모니터링을 통해 오염도 확산 여부를 지속적으로 파악해야 한다. 탁도가 증가하면 수질정화 능력이 저하되기 때문에, 탁도가 기준치를 초과할 경우 필터를 차단하고 미세한 화산재가 오랜 기간 남아 있는 경우 응집제를 추가하여 제거해야 한다.

백두산 분화 시 하천, 호소, 저수지, 댐 등의 취수원으로부터 안정적인 상수도 공급을 받기 위해서는 정부 차원의 관리정책 및 체계가 필요하며, 낙하 화산재 피해 대응을 위해 하천과 호소, 댐, 저수지 상·하수도 등의 수자원과 관련 시설을 모두 포함한 관리기준이 수립되어야 한다.

본 연구에서는 화산재 피해 저감을 위한 상수도 시설의 관리기준 설정을 위해 국외의 화산 분화 사례, 화산재로 인한 피해 사례 등을 조사하였으며, 조사 결과를 분석하여 관리 기준의 방향을 선정하고, 피해요인과 구체적인 피해 대상을 도출하였다. 또한 국내의 화산 재난 대응 보고서, 피해대응 매뉴얼, 대규모 수질오염 위기대응 실무매뉴얼 및 수질오염 매뉴얼 등을 검토하여 각 피해대상에 대한 관리기준(안)을 설정하였다.

국외 피해 사례 조사

국외 피해 사례 조사는 문헌조사를 통해 이루어졌으며, 각종 보고서와 논문의 자료를 수집하여 정리하였다. 과거 분화로 피해가 기록된 화산은 바누아투(Vanuatu)의 로페비(Lopevi) 화산(2003년 분화), 뉴질랜드(New Zealand)의 루아페우(Ruapehu) 화산(1969년 분화), 알래스카(Alaska)의 스퍼(Spurr) 화산(1953년 분화), 아이슬란드(Iceland)의 헤크라(Hekla) 화산(1947년 분화), 미국(USA)의 세인트 헬렌즈(Saint Helens) 화산(1980년 분화) 등이며, 인도네시아(Indonesia)의 탐보라(Tambora) 화산(1815년 분화) 등의 20세기 이전의 화산은 기록이 정확하지 않은 이유로 분석에서 배제하였다.

조사 결과 화산재에 의한 상수도 영향 중 가장 적은 1 mm 이하의 화산재가 퇴적되었을 경우, 주택의 빗물 집수 시설과 장비에 경미한 손상 가능성이 있었으며, 집수시설 물탱크의 수질이 오염되었다. 수질 오염의 원인은 불소농도의 증가로 0.4~0.7 mg/L에서 1.3~2.7 mg/L로 나타났다. 취수원이 영향을 받은 경우는 루아페우 화산에서 보고되었으며, 1~6 mm의 화산재가 퇴적되었을 때 pH를 5.3으로 감소시켰고, 불소 농도를 증가시켰다(Table 1). 국외 화산재 피해 검토 결과 대부분

의 상수도에서 pH 감소와 불소농도 증가가 보고되었고, 영향을 미치는 기간이 몇 시간에서 수 일로 짧게 나타났다.

Table 1. Historic impacts in receiving waters with different thicknesses of volcanic ash.

Year	Country, City	Volcano	Thicknesses of Ash (mm)	Damage in water	Source
1947	Iceland	Hekla	10~100	- Fluoride concentrations in stream waters in areas - Changes in pH from a typical pH of 7 to a pH of 2.5	Thorarinsson, 1979
2000	Argentina, Neuquén	Copahue	30~50	- Ashfall-related damage caused power outages to water treatment plants, and cut off potable water supplies	Smithsonian Institution, 2000
1969	New Zealand, Iwikau	Ruapehu	6~7	- Acidity of the tank water ranged from pH 6 to 4.4. - Excessive fluoride concentrations were measured in one tank	Collins, 1978
1953	USA, Alaska	Spurr	3~6	- The pH level fell to 4.5 before returning to normal after a few hours - Turbidity rose from 5 ppm to 290 ppm and lasted for six days before returning to normal	Wilcox, 1959
1969	New Zealand, Whakapapa	Ruapehu	1~6	- The pH of the stream fed water supply to drop to 5.3 and the turbidity to increase markedly	Collins, 1978
2003	Vanuatu	Lopevi	< 3	- Rainfall-fed water tanks were elevated from pre-event values of 0.4-0.7 mg/L fluoride to 10 mg/L	Cronin et al., 2003
2003	Vanuatu	Lopevi	< 1	- Rainfall-fed water tanks were elevated from pre-event values of 0.4-0.7 mg/L fluoride to 1.3-2.7 mg/L	Cronin et al., 2003

피해사례 유형화 및 피해요인 도출

화산재 퇴적에 따른 상·하수도 피해사례 조사 결과를 이용하여 관리기준 수립 시 고려해야 할 피해 대상을 선정하였다. 하천환경과 상·하수도 시설, 하수관에 대해서 피해 대상을 선정하였고, 각 대상별로 화산재 피해 유형을 분류하였다. 또한 국내에 발생가능성이 있는 유사 피해를 분류하여 관리 기준 수립 시 참고하고자 하였다.

하천 환경에 발생 위험이 있는 화산재 피해는 취수 수질 불량, 탁도 증가, 산도 감소, 미생물 과잉 번식, 하상 증가, 퇴적물 용출 등이 있으며, 하류 지역일수록 유속이 느리고 하폭이 넓으며 유량이 많기 때문에 피해는 더욱 가중될 것으로 예상된다. 또한 용수 이용과 취수를 중점으로 하는 댐과 저수지는 독성 오염과 탁도로 인한 미생물 증가에 민감하므로 이를 관리할 수 있는 관리 기준의 수립이 필요하다. 시설의 위험 측면에서 상수도 시설의 위험요소는 스크린 손상, 약품 과다 투입, 침전 방해와 같은 수처리 방해, 전력 공급 중단에 따른 펌프 가동 중단 등이 있다. 상·하수도 관로의 위험요소는 화산재 퇴적에 따른 빗물받이 막힘, 관로 막힘, 흡착에 따른 부식, 물리적 성질에 따른 손상 등이 있다. 화산재 피해와 유사한 환경 오염으로는 물리적인 오염 사례와 화학적 오염사례가 있다. 물리적인 오염은 황사, 비산재 유입, 석탄재 유입, 토사 유입, 월류 등이 있으며, 화학적인 오염은 유해화학물 유입, 오탁수 유입, 조류 번식, 물고기 폐사 등이 있다.

최종적으로 상수도 시설과 부설 시설에 대한 피해 요인을 퇴적, 흡착/침착, 마모로 나누어 예상되는 피해 정도를 분류하였다(Table 2). 이를 통해 각 시설별 관리를 위한 우선순위를 선정하고 불필요한 관리 요소를 배제하였다.

Table 2. Classification of water systems damage and deriving the damage factors.

Water system	Damage factors		
	Accumulation	Absorption	Abrasion
Water intake facilities	Screen	●	●
	Sluice Valve	●	●
	Sand sedimentation pond	●	●
	Intake pump	●	●
Clean water facilities	Flocculation Facilities	●	●
	drainage pump	●	●
	Filter Facilities	●	●
	Outside tank storage	●	●
Water transport facilities	Water carrier pipe line	●	●
	Water conveyance pipe line	●	●
	Water drainage pipe line	●	●
	Water supply pipe line	●	●

● (Damage occur), ● (Damage possible), ○ (No damage)

화산재 피해등급 설정

국외 화산재 오염으로 인한 피해사례 조사 결과 1 mm 이하의 퇴적 두께에서는 수질 오염 가능성과 경미한 피해가 보고되었다. 1 mm보다 더 많은 양의 퇴적량에서는 실제 수질 오염이 보고되었고, 300 mm 이상의 퇴적량에서 심각한 피해가 발생한 것으로 나타났다.

본 연구진은 선행연구를 통해 백두산 화산재 성분과 유사한 화산인 Pacaya, Fuego 화산을 선정하고, 선정된 화산의 분화시 측정된 화산재 성분(알루미늄, 카드뮴, 불소, 철, 납, 마그네슘, 염소와 스트론튬 등) 농도와 국내 먹는물 수질기준과 분석한바 있다(Jee et al., 2014). 이때 사용된 방법론은 Stewart et al. (2006)이 제안한 것으로 화산재 퇴적 두께에 따른 화학적 오염 부하 농도를 산출하였다(식 (1)).

$$C_{water} = C_{ash} TDA / V \tag{1}$$

여기서, C_{water} 은 화산재가 퇴적되는 유역의 화학적 오염 부하 농도(mg/L)이고, C_{ash} 는 침출된 화산재의 농도(mg/kg), T 는 화산재의 두께(m), D 는 화산재의 밀도(kg/L), A 는 화산재가 퇴적되는 저수면적(m²), V 는 화산재가 퇴적되는 유효저수용량(m³)을 나타낸다.

화산재 퇴적량 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 mm로 변화시켜가며 분석한 결과, 1~5 mm 범위에서는 알루미늄과 마그네슘, 5~10 mm 범위에서는 불소와 철, 10 mm 이상의 범위에서는 납과 카드뮴 등의 중금속이 수질기준을 초과한 것으로 나타났다(Fig. 1), 화산재 피해등급 설정을 위한 참고자료로 활용하였다.

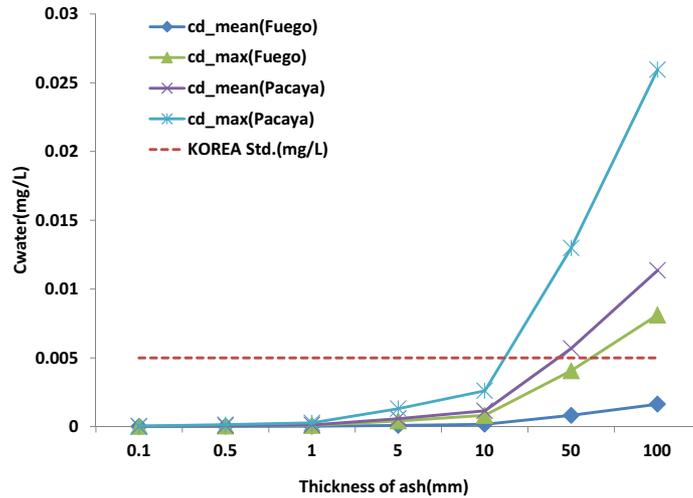


Fig. 1. Analysis of cadmium concentration by volcanic ash thickness (Jee et al., 2014).

최종적으로 화산재로 인한 상수도 시설의 관리 기준 단계는 VAD (Volcanic Ash Degree) 4단계로 도출하였다. VAD I 은 평시 수준의 화산재로 VAD IV로 갈수록 화산재 양이 증가하는 것으로 지표를 구성하였으며, 국내 먹는물 수질기준 (Table 3)을 이용한 화산재 퇴적 두께에 따른 화학적 오염 부하 농도 분석 결과와 국외 화산재 피해 조사 결과를 이용하여 0~1 mm은 VAD I, 1~3 mm는 VAD II, 3~5 mm는 VAD III, 5 mm 이상은 VAD IV로 정의하였다(Table 4).

Table 3. Drinking Water Quality Standard (mg/L).

Element	Al	Cd	Cl	F	Fe	Mg	Pb	Sr
Korea STD.	0.20	0.005	250	1.50	0.30	0.30	0.01	4.00

Table 4. Establishment of hazard level for volcanic ash.

Thickness of Ash (mm)	VAD (Volcanic Ash Degree)	Hazard level of volcanic ash
0 ~ 1	I	Normal level
1 ~ 3	II	Partially volcanic ash impact expected
3 ~ 5	III	Partially volcanic ash damage expected
5 <	IV	Significant volcanic ash damage expected

분석 결과 화산재 퇴적에 따른 위험 단계의 설정에 있어 상수도 시설은 수중의 화산재 물질의 퇴적에 기인하고, 대기로 부터 지표면에 낙하하는 화산재에 영향을 받는 것으로 나타났다. 관리등급 수립에 있어 화산재 퇴적에 따른 상수도 시설 의 위험 단계와 별개로 강한 유독성 물질인 중금속에 대해서는 별도의 관리 기준이 필요할 것으로 판단된다.

상수도시설 관리 기준(안) 설정

화산재 피해 저감을 위한 상수도 시설의 관리 기준(안)의 수립은 중요 시설인 취수 시설과 정수 시설을 대상으로 수립하 였고, 상수관망인 도수, 배수, 급수, 송수 시설에 대한 관리 기준은 취수시설과 정수시설의 관리 기준(안)에 포함하였다. 이

와 함께 상수도 시설 피해 판단을 위한 기준 및 대응 절차를 수립하였다. 대응 절차는 하천의 화산재 물질 검출 여부에 따라 퇴적량을 조사하며, 화산재 퇴적 여부 확인시 개별 항목 분석을 통해 VAD 2단계 이내가 24시간 검출될 시 취정수장의 운영이 부분 제한되며, VAD 3단계 허용 기준 초과 정도에 따라 취정수장의 운영이 중단되게 구성하였다(Fig. 2).

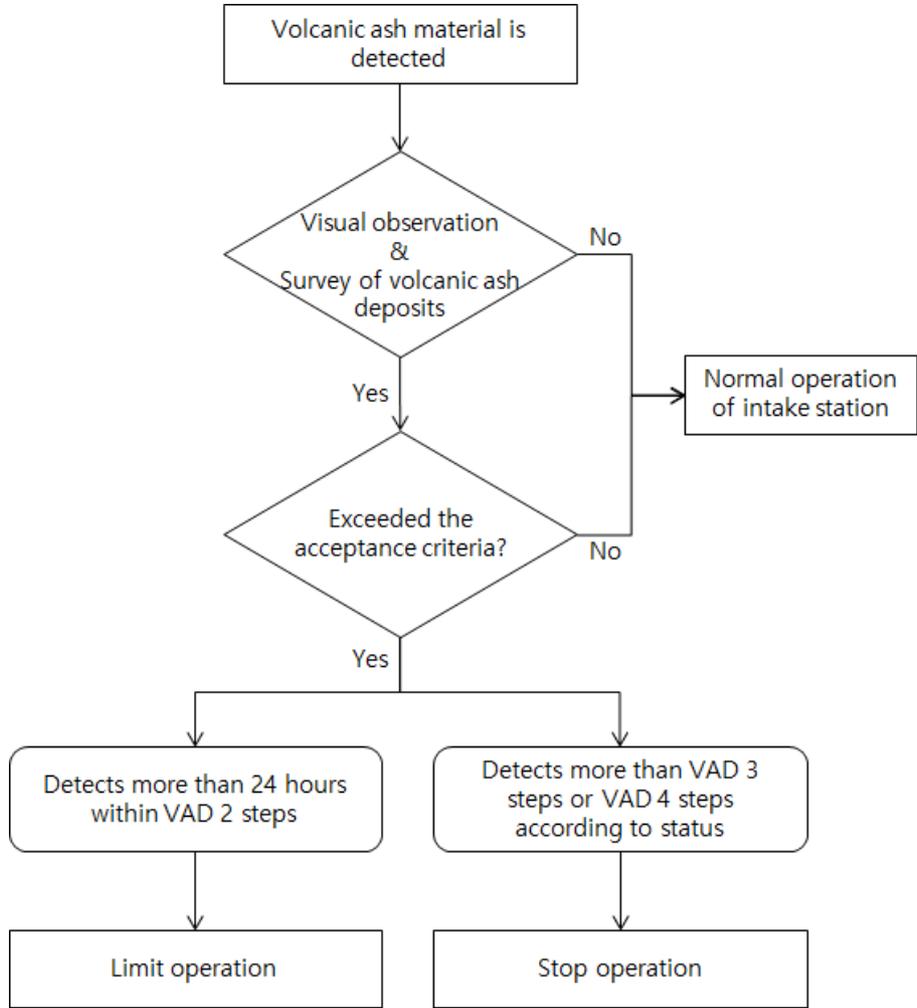


Fig. 2. Flow-chart of water system damage management.

관리 기준(안)은 화산재 퇴적 두께에 따른 경보 단계의 분류, 시설에 대한 화산재 영향, 피해 대응 방안 등으로 구성하였다. VAD 1단계는 평시 수준으로 정상 취수가 가능한 상태로 간이 수질 측정을 실시한다. VAD 2단계는 화산재 영향이 부분적으로 예상되는 상태로 비상근무를 실시하고, 일부 시설물을 덮개 처리하며, 취수원 주변 방제선 설치 및 중금속 분석을 실시한다. VAD 3단계는 화산재로 인한 피해가 일부 발생될 것으로 예상되는 상태로 후각, 육안, 물질 비중 및 부유물질 농도를 정밀 분석한다. VAD 4단계는 상당 양의 화산재로 인한 피해가 우려되는 상태로 판단 기준에 따라 취수중단 및 주민 경보를 발령하며, 방제 작업을 위한 사고대책반을 운영하는 것으로 구성하였다(Table 5).

Table 5. Water systems damage management standard caused by Mt. Baekdu Eruption.

VAD	Thicknesses of Ash (mm)	Status of water system	Action plan
I	0~1	<ul style="list-style-type: none"> - In the early stage of eruption - No detection of volcanic ash in water - Outside water facility warning code is green alert 	<ul style="list-style-type: none"> - Normal intake - simplified water quality measurement
II	1~3	<ul style="list-style-type: none"> - Volcanic ash deposition on surface and in the water - Water pollution occurrence - Outside water facility warning code is yellow alert 	<ul style="list-style-type: none"> - Emergency work permit - Put a cover to prevent volcanic ash from accumulating - Establishment of a control line around a water source - Conduct heavy metal analysis - Identify downstream water pollution status
III	3~5	<ul style="list-style-type: none"> - Increase of volcanic ash deposition in the water - Increase of water pollution - Outside water facility warning code is orange alert 	<ul style="list-style-type: none"> - Accuracy analysis of olfactory, visual, material specific gravity, SS(Suspended Solids) concentration - Operation of bio-based wired and wireless alarm systems
IV	5 <	<ul style="list-style-type: none"> - Volcanic ash is seriously deposited on the surface and in the water - Outside water facility can not be operated - Significant water pollution - Outside water facility warning code is red alert 	<ul style="list-style-type: none"> - Operation of residential & commercial Alarms - Operation of incident response team or emergency response team - Operation of emergency power system - Downtime and time to repair

결론 및 토의

본 연구는 백두산 분화시 피해가 예상되는 상수도 시설의 관리 기준을 설정하는 것을 목적으로 진행되었으며, 주요 결론 및 시사점은 다음과 같다.

1. 백두산 분화로 인한 상수도 시설의 관리 기준 수립을 위해 다양한 국외 지역의 화산 분화 사례와 피해사례, 피해 분야 등을 조사하였다. 과거 피해가 발생한 화산은 Lopevi(바누아투), Ruapehu(뉴질랜드), Spurr(알래스카), Hekla(아이슬란드), Copahue(아르헨티나) 등이며, 조사 결과 대부분의 상수도 피해 사례에서 pH 감소와 불소농도 증가가 보고되고, 영향을 미치는 기간은 몇 시간에서 수 일로 조사되었다.
2. 국외 피해사례 조사 결과를 바탕으로 상수도 시설과 부설 시설에 대한 피해 요인을 퇴적, 흡착/침착, 마모로 나누었으며, 예상되는 피해 정도를 분류하였다.
3. 피해 사례 조사 결과와 정량적 위험 평가 결과를 종합하여 화산재 퇴적 두께에 따른 상수도 시설의 관리 기준은 VAD(Volcanic Ash Degree) 4단계로 도출하였다. 화산재 퇴적량이 0~1 mm 경우 VAD I단계로, 1~3 mm는 VAD II단계, 3~5 mm는 VAD III단계, 5 mm 이상은 VAD IV단계로 구성하였다.
4. 상수도 시설의 관리 기준 4단계에 따라 위험 경보 단계, 상수도 시설 영향 및 피해 대응 방안 등으로 구성된 상수도 시설 관리 기준(안)을 설정하였으며, 상수도 시설 피해 저감을 위한 대응 절차를 제시하였다.

현재 우리나라는 화산재에 의한 재해 이력이 전무하기 때문에 백두산 분화시 화산재에 대한 영향 분석 및 상황 판단을 위한 기초자료가 부족하다. 이에 따라 본 연구에서는 국외에서 과거 화산 분화시 하천에 응축되는 화산재 퇴적 두께 및 피해 조사 결과를 바탕으로 국내의 상수도 시설 관리 기준(안)을 제시하였다. 추후 백두산 분화 및 화산재 피해 상황을 가정

한 모의 재난 훈련 등을 통해 본 연구에서 제시된 관리 기준(안)의 문제점을 지속적으로 개선할 수 있는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-07].

Reference

- Collins, C.M., 1978, Contamination of water supplies and water courses. Appendix 2, In: Healy, J.; Lloyd, E.F.; Rishworth, D.E.; Wood, C. P.; Glover, R.B.; Dibble, R.R.; The eruption of Ruapehu, New Zealand, on 22 June 1969. DSIR Bulletin 224.
- Cronin, S.J., Platz, T., Charley, D., and Turner, M., 2003, The June 2003 eruption of Lopevi volcano, Vanuatu. Geological Society of New Zealand Miscellaneous Publication 116A, 42.
- Jee, Y.K., Lee, K.B., Choi, J.R., and Kim, J.T., 2014, Assessment of water quality in paldang-dam surface area through the estimation of volcanic ash toxic components from Mt. Baekdu, Journal of Korea Water Resources Association, 47(3), 237-245 (in Korean with English abstract).
- Jiang, Z.H., Yu, S.Y., Yoon, S.M., Choi K.H., 2013, Damage and Socio-Economic Impact of Volcanic Ash, Journal of the Korean Earth Science Society, 34(6), 536-549 (in Korean with English abstract).
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011, Eruption scenarios of the Baekdusan volcano, Volcano, 4p.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security), 2015, Development of Environmental Management Technique for Prevention and Reduction of Volcanic Ash Damage, Damage, 319p.
- Smithsonian Institution, 2000, "Copahue." Bulletin of the Global Volcanism Network, 25(6), 7-10.
- Stewart, C., Johnston, D.M., Leonard, G.S., Horwell, C.J., Thordarson, T., and Cronin, S.J., 2006, Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 158(3-4), 296-306.
- Thorarinsson, S., 1979, On the damage caused by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases. In: Sheets, P.D.; Grayson, D.K. (eds.) Volcanic activity and human ecology. Academic Press. 125-156.
- Wilcox, R.E., 1959, Some effects of recent volcanic ash with special reference to Alaska. United States Geological Survey Bulletin 1028 N: 409 476. Washington, US Government Printing Office.
- Yun, S.H., Lee, J.H., 2011, Volcanological Interpretation of Historic Record of 1702 Fallout-ash from the Mt. Baegdusan, Journal of the Korean Petrological Society, 20(4), 243-250 (in Korean with English abstract).