

백두산 화산재 유해성분 추정을 통한 팔당댐 유역 수질영향 평가 Assessment of Water Quality in Paldang-dam Surface Area through the Estimation of Volcanic Ash Toxic Components from Mt. Baekdu

지 용 근* / 이 경 빈** / 최 정 렬*** / 김 지 태****

Jee, Yong Keum / Lee, Gyeng Bin / Choi, Jung Ryel / Kim, Ji Tae

Abstract

Volcanic ash components of Mt. Baekdu were estimated to response the change of water quality environment affected by Mt. Baekdu volcanic ash ejected during eruption. Then the change of water concentrations according to the sedimentation of volcanic ash components were analysed. To estimate volcanic ash components of Mt. Baekdu, similar volcanos were selected through the comparison of main foreign volcano's magma type and the selected volcanic ash components supposed as Baekdu Mountain's. To analyse the change of water concentrations, the change of harmful components affected by volcanic ash sedimentation were analysed and the results were compared with domestic drinking water quality standard. As the result, Al, Cd, F, Fe, Pb, Mg, Cl and Sr could affect to water quality. Among those components, concentrations of Cd, F, Fe, Pb and Mg were estimated to exceed the drinking water quality standard.

Keywords : Mt. Baekdu Volcanic ash, Volcanic ash sedimentation, Volcanic ash components, Drinking water quality standard

요 지

백두산 분화 시 분출되는 화산재에 의한 수질환경 변화에 대응하고자 본 연구에서는 백두산 화산재 성분을 추정하고, 화산재 퇴적 두께에 따른 수질 농도변화를 분석하였다. 백두산 화산재 성분을 추정하기 위해 주요 해외 화산의 마그마 성분과 백두산의 마그마 성분을 비교하여 유사한 화산을 선정하고, 해당 화산에서 분출한 화산재의 성분을 백두산의 화산재 성분과 유사한 것으로 가정하였다. 화산재 유해성분에 의한 수질 농도변화를 분석하기 위해 화산재 퇴적 두께에 따른 유해성분 농도의 증감을 분석한 후, 국내 먹는물 수질기준과 비교함으로써 수질환경에 대한 영향 유무를 평가하였다. 연구 결과, 알루미늄, 카드뮴, 불소, 철, 납, 마그네슘, 염소와 스트론튬 등이 취수원에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이 중 카드뮴, 불소, 철, 납, 마그네슘의 경우에는 수질관리 및 화산분출 시 관리가 필요할 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 백두산 화산재, 화산재 퇴적, 화산재 성분, 먹는물수질기준

* 교신저자, (주) SDM 엔지니어링 기술연구소 책임연구원 (e-mail: ykjee@sdmeng.co.kr, Tel: 82-2-2026-1792)

Corresponding Author, Senior Research Engineer, R&D Team, SDM Engineering Co. Ltd., 1110 Namsung Plaza, 130 Digital-Road, Geumcheon-gu, Seoul, Korea

** (주) SDM 엔지니어링 기술연구소 연구원 (e-mail: sayodo@sdmeng.co.kr)

Research Engineer, R&D Team, SDM Engineering Co. Ltd., 1110 Namsung Plaza, 130 Digital-Road, Geumcheon-gu, Seoul, Korea

*** (주) SDM 엔지니어링 기술연구소 연구원 (e-mail: lovekurt82@sdmeng.co.kr)

Research Engineer, R&D Team, SDM Engineering Co. Ltd., 1110 Namsung Plaza, 130 Digital-Road, Geumcheon-gu, Seoul, Korea

**** (주) SDM 엔지니어링 대표 (e-mail: jtkim@sdmeng.co.kr)

President, SDM Engineering Co. Ltd., 1110 Namsung Plaza, 130 Digital-Road, Geumcheon-gu, Seoul, Korea

1. 서 론

우리나라는 유럽이나 남미, 일본의 경우와 달리 화산폭발의 안전지대로 여겨져 왔으나, 최근 백두산의 분화 가능성이 제기되면서 화산폭발에 대한 대응방안 수립의 필요성이 제기되고 있다. 특히 백두산은 대규모 분화 이력을 가지고 있어, 과거의 폭발적인 대규모 분화가 재현될 경우 사회·경제적 파장과 함께 심각한 환경변화가 발생할 것으로 예상되고 있다. 또한 산업화와 도시화의 영향으로 인구 및 사회기반시설이 집중됨에 따라 과거의 재해와는 달리 인명 및 재산 피해의 범위가 클 것으로 예상되고 있다. 우리나라는 백두산과 약 400km 이상 떨어져 있지만 백두산의 분화가 발생하였을 경우, 한반도 주변으로 북풍~북동풍이 발달하게 되면 남한까지 화산재가 확산될 가능성이 있으며, 특히 봄철에 화산재가 남한에 유입할 가능성이 제일 높을 것으로 예상되고 있다(NIMR, 2011). 동절기의 경우에는 북풍의 발달로 인해 화산재의 간접적인 영향권에 들게 될 것으로 예상되고 있다(MSF, 2010). Lee et al. (2012)은 대기역학모형과 확산모형을 이용하여 백두산 분화에 따른 화산재 확산을 모의하여 한반도의 영향을 분석하였다.

확산된 화산재는 미량이라도 전기와 물 공급 및 수송 네트워크, 상·하수도 시설 등의 사회 인프라 시설의 운영 및 작동에 영향을 미칠 수 있다(Blong, 1984; Johnston et al., 2000). 화산재에 의해 영향을 받는 환경 분야 중 수자원과 수자원 공급 시설의 영향은 사람이 생활하는데 가장 밀접한 영향을 미친다. 특히 식수와 생활용수 공급을 위한 하천, 저수지 등의 상수원에 피해가 발생할 경우, 용수를 공급받는 지역에는 사회적 혼란이 발생할 위험이 있다. 1995년부터 1996년 사이에 뉴질랜드에서 분화한 Ruapehu 화산의 화산재는 상수도 시설을 오염시켜 인근 지역의 수자원의 탁도와 산도 등에 영향을 미쳤다(Johnston, 1997a; Johnston et al., 2000). 화산재에 의한 수자원 영향을 평가한 연구로는 화산재의 물리적인 영향에 관한 연구(Blong, 1984; Johnston, 1997a), 수자원부족(Johnston, 1997b), 탁도 증가(Weniger et al., 1983), 산도 감소(Smithsonian Institution, 2000), 불소 오염(Cronin et al., 2003) 등이 있으며, Witham et al. (2004)은 화산재 침출 성분에 관한 다양한 연구를 분석하여 화산재 영향을 종합한 연구를 발표하였다. Johnston et al. (2004)은 수자원 피해와 관련한 여러 지역의 화산재 피해를 종합한 연구를 발표하였으며, 이와 함께 상수원의 화학적인 오염을 분석하기 위한 연구로 간단한 화산재 위험평가 모델을 제안하였고 이 모델을

이용한 Ruapehu 화산에 의한 오클랜드 지역의 상수원 영향을 화산재 퇴적 두께별로 분석 하였다. 또한 Stewart et al. (2006)은 화산재 성분의 농도와 뉴질랜드, 일본, 미국, WHO의 음용수 기준을 비교하여 화산재 성분의 화학적인 위험성을 제시하였다.

본 연구는 백두산 분화 시 발생하는 화산재 피해를 저감하고, 국내 환경변화에 대응하기 위한 환경 관리기준을 수립하기 위한 기초연구로 관리기준 수립 방향을 제시하고자 하였다. 또한 서울을 포함하는 수도권 지역의 주요 수원인 팔당댐 유역에 대해 화산재 퇴적에 따른 오염정도를 분석하고자 하였다. 이를 위해 첫 번째, 백두산 화산의 마그마 성분을 분석하여 유사한 화산을 선정하고, 선정된 화산에서 분출되는 화산재의 성분을 추정하였으며 추정된 화학 물질 농도에 대한 유해성분을 분석하였다. 두 번째, 화산재 퇴적 두께에 따른 취수원에 대한 유해성분 농도 변화를 분석하고 국내의 수질기준 중 먹는물 수질기준과 비교하여 수질환경에 대한 영향을 평가하였다.

2. 분석 방법

2.1 화산가스 및 화산재의 영향 범위

화산의 폭발적인 분화는 고체 상태와 용융된 상태의 암석 파편과 화산가스를 공기 중으로 분출한다. 가장 큰 암석파편은 화구에서 3km 이내의 지표에 떨어지고, 화산 유리, 광물, 미세 파편(직경 2mm 이하)은 분화 기둥을 형성하면서 대기 중으로 방출된다. 화산 활동으로 인한 충격이나 화산가스의 침식 등으로 부서진 상태로 방출되는 암편(rock fragment)을 화산쇄설물이라 하며, 분출된 파편 가운데 크기가 0.25~4mm 정도의 작은 알갱이들의 퇴적물을 화산재라 한다.

화산재에 포함된 유해성분은 유리와 크리스탈, 수용성 물질, 산, 염 등이며 화산재 입자 및 화산가스는 상호작용으로 확산된다. 화산 폭발은 대기 중에 수증기(H_2O), 이산화탄소(CO_2), 아황산가스(SO_2), 염산(HCl), 불화수소산(HF) 등의 성분을 함유한 화산가스 및 휘발성 금속을 분출한다. 화산폭발로 발생하는 이산화탄소는 지구온난화의 원인이 되기도 하며, 대부분의 아황산가스는 천천히 황산(H_2SO_4) 미세입자의 에어로졸로 변해 태양복사에너지를 반사시키고 지구열을 흡수시킴으로써 지구를 냉각시킨다. 또한 에어로졸은 성층권의 염소, 질소화합물과 반응하여 오존층을 파괴시키고 염산과 불화수소산은 대기 중 수증기에 용해되어 산성비를 통해 지표면 및 지표수를 오염시키는 등 대기, 수질, 토양 등에 영향을 미치게 된다(Fig. 1). 퇴적된 화산재의 경우는 토양 및 수질환경에 영

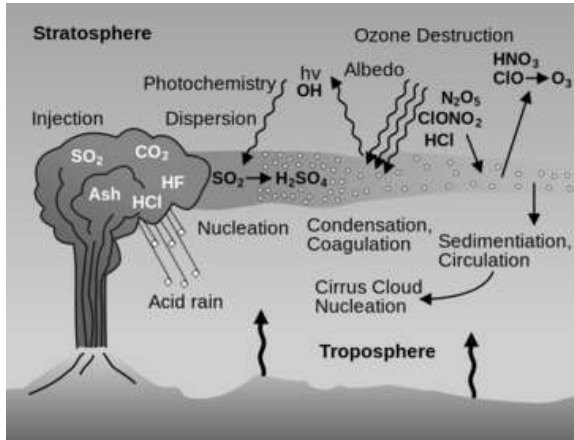


Fig. 1. Processes Occurring within Volcanic Plumes (from USGS).

향을 미치게 되며, 퇴적두께에 따라 그 영향정도가 달라지는 것으로 분석된 바 있다(Johnston et al., 2004).

2.2 화산재 위험 평가 기법

수질에 미치는 화산재의 영향을 평가하기 위해 Johnston et al. (2004)은 수자원 오염 및 지표수 오염 평가기법을 제안하였다. Johnston et al. (2004)은 뉴질랜드 루아페우 화산에 대한 피해 분석과 대응을 위한 연구에서 화산재에 의한 유역의 수질 변화를 제안된 모델을 이용하여 평가하였고, Stewart et al. (2006)은 본 모델을 이용하여 화산재의 화학성분에 대한 분석과 수질기준과의 비교를 통해 수질 변화의 위험을 제시하였다.

제안된 평가기법은 화산재 성분, 저수 용량, 저수 면적, 화산재의 밀도와 퇴적량 등을 수식화하여, 화산재에 의한 유역의 화학적 오염 부하 농도를 산출한다(Eq. (1)).

$$C_{water} = C_{ash} TDA / V \quad (1)$$

C_{water} 는 화산재가 퇴적되는 유역의 농도 증가(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(m^2), V 는 화산재가 퇴적되는 유효저수 용량(m^3)을 나타낸다.

2.2.1 입력 변수

최근의 연구 보고에 따르면, 퇴적된 건조 화산재의 밀도는 $500 \sim 1500 \text{ kg/m}^3$ 의 범위를 가지는 것으로 분석되었다(Kienle, 1980; Moen and McLucas, 1980; Scott and McGimsey, 1994; Cronin et al., 1998). 본 연구에서는 정확한 백두산 화산재의 밀도를 분석하기 어렵기 때문에 최

근의 연구결과에서 제시한 화산재 밀도의 평균인 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 을 적용하였다.

퇴적량에 따른 오염정도를 분석하기 위해 퇴적량은 0.1 mm, 1.0 mm, 5.0 mm, 10.0 mm의 4단계로 오염정도를 구분하여 적용하였다. 실질적으로 퇴적량은 기상정보를 동반한 다양한 환경에서의 화산재 확산 시뮬레이션을 통해 추정하여 적용할 수 있으나, 본 연구는 확산에 정확도를 맞추기보다는 퇴적량에 따른 오염정도에 초점을 맞추어 분석을 실시하기 위해 오염정도를 구분하여 적용하였다.

2.2.2 오염 잠재력(A/V)

서울을 포함한 수도권 지역의 주수원인 팔당댐과 대전광역시 지역의 수원을 담당하는 대청댐, 대구광역시의 수원을 담당하는 운문댐, 광주광역시의 수원을 담당하는 주암댐, 제주도의 수산저수지를 대상으로 오염잠재력을 산출하였다. 그 결과, 팔당댐 유역의 오염잠재력이 2.03으로 가장 컸으며, 그 이유는 다른 지역의 취수원에 비해 저수면적이 크지만 상대적으로 저수용량이 작기 때문인 것으로 분석되었다(Table 1). 본 연구에서는 오염 잠재력이 가장 큰 팔당댐을 대상으로 화산재에 의한 수질환경 영향을 평가하였다.

2.3 수질기준

팔당댐 유역은 수도권의 중요 취수원으로 역할을 수행하고 있기 때문에, 화산재에 의한 팔당댐 저수지역의 오염은 수도권 용수공급에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 따라서 취수원의 화산재 성분별 위험도 평가를 위해 우리나라 먹는물 수질기준과 비교하였다. 그 중에서 분화한 화산의 화산재에 영향을 받을 것으로 예상되는 알루미늄(Al), 카드뮴(Cd), 불소(F), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 염소(Cl), 납(Pb), 스트론튬(Sr) 8개 성분(Table 2)과 위험평가

Table 1. Area and Capacity of Korea's Basin

Basin	Watershed Area (m^2)	Capacity (m^3)	A/V
Paldang dam	36,500,000	18,000,000	2.03
Daecheong dam	72,800,000	790,000,000	0.09
Unmun dam	7,830,000	126,200,000	0.06
Juam dam	33,000,000	352,000,000	0.09
Susan reservoir	127,169	681,000	0.19

Table 2 Drinking Water Quality Standard (mg/L)

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

모델의 결과와 비교하여 등급을 구분하였다.

3. 결 과

3.1 백두산 화산재 성분 추정

화산 분출로 발생하는 화산재의 성분은 지하의 마그마의 압력에 따라 결정된다. 지하의 마그마는 분출하면서 현무암질 마그마가 냉각되면 철(Fe), 망간(Mg), 칼슘(Ca)의 함량이 작아지고 이산화규소(SiO₂), 나트륨(Na), 칼륨(K)의 함량은 많아져서 안산암질 마그마가 되고, 이후 유문암질 마그마가 된다. 마그마가 지표면으로 유출되어 만들어진 화성암은 일반적으로 실리카(SiO₂)의 양에 따라 현무암, 안산암, 유문암, 데이사이트(decite) 등 4가지의 유형으로 나누어지며, 그 외에 티타늄(TiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 철(FeO 또는 Fe₂O₃), 망간(MnO), 마그네슘(MgO), 칼슘(CaO), 나트륨(Na₂O), 칼륨(K₂O), 인(P₂O₅) 등의 성분을 포함한다. NDMI (2010)은 백두산 일원에서 관측 가능한 지진과 중 P파 또는 S파의 속도 분포로 분석한 지진과 토모그래피 결과, 백두산 천지 지하의 4개 마그마방 중 위의 2개는 유문암질 내지 조면암질 마그마, 아래 2개는 현무암질 마그마로 추정하였다.

백두산에서 분출이 예상되는 마그마의 구체적인 화학성분과 분출농도를 추정하기 위해 과거에 분화한 Fuego 화산, Pacaya 화산, Santiaguito 화산, Helens 화산, Ruapehu 화산의 화산재 성분 농도를 조사하였다(Table 3).

Fuego 화산의 마그마 성분은 현무암질이며, Pacaya 화산의 마그마는 현무암과 안산암, 그리고 데이사이트로 구성된 것으로 분석되었다. 또한 Santiaguito 화산과 Helens 화산은 데이사이트, Ruapehu 화산은 안산암으로 이루어져 있는 것으로 분석되었다. Ruapehu 화산을 제외한 4개 화산의 화산재의 성분에 대한 농도는 차이를 나타내고 있

었지만, 화산재 구성 성분은 유사한 것으로 나타내었다 (Table 4).

과거 분화 이력을 가진 화산의 화산재 성분분석을 통해 백두산 화산재의 성분을 유추한 결과, 백두산 화산은 현무암과 데이사이트 조성의 마그마인 Pacaya 화산과 현무암 조성의 마그마인 Fuego 화산과 유사한 성분의 화산재를 분출 할 것으로 판단하였다.

3.2 성분별 위험도 분석 결과

과거 분화한 화산재의 화학성분을 국내 화학물질 안전관리 정보시스템에 등록된 화학물 정보와 비교하여 화산재 성분의 유해성을 분석하였다. Table 5는 백두산과 유사한 Pacaya 화산과 Feugo 화산의 화산재 성분 평균 농도와 국내 위험노출기준 농도를 비교한 결과이다.

Pacaya 화산재 성분의 평균 농도 분석 결과, 우라늄(U)이 가장 적은 0.08배, 염소(Cl)가 가장 많은 29142.8배의 농도 차이를 보였다. Fuego 화산재 성분의 평균 농도의 경우에는 염소 농도가 가장 큰 차이를 보였다.

분석결과 중 우라늄의 농도가 작은 이유는 자연계에 분포된 양이 적기 때문이며, 염소는 화산가스로 분출되는 염소가스와 성층권에 분포하는 염소의 반응으로 농도가 높은 것으로 판단되었다. 또한 화산 내부의 강한 압력에 의해 물질들이 농축되어 있기 때문에 배출되는 화산재의 농도가 높은 것으로 판단하였다.

표면에 산성 물질이 코팅된 화산재와 산성가스 등에서 검출된 알루미늄, 비소, 염소, 불소, 철, 수은, 납, 황산, 세슘 등 유해성을 가진 화산재 성분들은 수자원 또는 빗물에 용해되어 수자원에 악영향을 미칠 수 있다. 호수나 강물은 음용수로서의 역할을 불가능하게 되고 상·하수도의 살균을 저하시키며 상·하수도 설비를 파괴시키기 때문에 화산재의 화학 성분들은 수질 환경에 피해를 발생 시킬 위험이 있다. 또한 수자원에 화산재가 직접 영향을 미치는 것 이외에 대기 중으로 분출된 화산가스에 의해 생성되는 산성비로 인한 수자원 오염도 발생하게 된다.

3.3 수질환경에 대한 영향 평가

화산재 위험평가 모델을 적용하여 화산재의 수질에 대한 영향을 평가하였으며(Tables 6 and 7), Fuego 화산과 Pacaya 화산의 화학 성분 중 알루미늄과 염소의 성분은 화산재 퇴적량(두께)에 따라 다른 화학성분에 비해 증가량이 큰 것으로 나타났으며, 특히 염소의 경우 가장 큰 농도 증가를 나타냈다. 카드뮴과 마그네슘, 납 등과 같은 중금속의 경우에는 화산재 퇴적량에 따라 유역에 발생하는

Table 3. Concentrations of Leachable Constituents in Ashfall from Historic Eruptions (mg/kg)

Element	Fuego, Guatemala		Pacaya, Guatemala		Santiaguito, Guatemala		Mt. St. Helens, USA		Ruapehu, New Zealand	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Median	Max
Al	5.2	26.8	12.8	21.2	5.2	19.6	-	-	42.8	1160
B	0.088	0.044	0.06	0.108	1.08	3.92	-	-	-	-
Ba	0.296	1	0.68	1.12	0.132	0.348	0.152	0.24	-	-
Br	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6	13.6
Ca	400	1040	196	304	600	2240	440	800	1890	6760
Cd	0.008	0.04	0.056	0.128	0.056	0.256	0.0052	0.0252	-	-
Cl	124	232	204	840	440	1400	392	668	248	2020
Co	0.0036	0.0328	0.0072	0.024	0.132	0.6	0.0196	0.072	-	-
Cu	0.324	2.52	1.24	2.36	1.56	2.8	0.164	0.48	-	-
F	21.2	88	28.8	44	14.4	23.2	7.2	12	25.8	95.6
Fe	2.08	22.4	2.8	9.2	1.56	3.6	0.376	0.48	5.74	92.8
K	-	-	-	-	-	-	-	-	36.1	253
Li	0.044	0.116	0.0036	0.064	0.4	1.88	0.208	0.52	0.5	1.45
Mg	22	44	19.6	52	96	400	48	84	235	1200
Mn	1.48	3.12	1	2.88	19.6	92	7.6	13.2	-	-
Na	128	184	156	440	400	1760	264	440	292	1150
Pb	0.104	0.96	0.014	0.044	0.0096	0.048	0.0092	0.072	-	-
Si	7.2	12.4	9.2	15.2	7.6	11.2	40	56	-	-
Sr	2	5.2	1.64	2.6	1.48	4.4	1.76	2.88	-	-
U	0.00108	0.0028	0.00008	0.00048	0.0012	0.006	0	0	-	-
V	0.06	0.128	0.0248	0.068	0.0364	0.08	0.0012	0.0264	-	-
Zn	0.144	0.56	5.6	18.8	2.04	8.4	2.04	26.8	-	-
Nitrate	-	-	-	-	-	-	-	-	21.9	88.9
Sulphate	-	-	-	-	-	-	1000	1800	5190	24530

Table 4. Magma Type of Volcano

Volcano	Magma type
Baekdu	Rhyolite, Trachyte, Basalt
Fuego	Basalt
Pacaya	Decite, Basalt
Santiaguito	Decite
Saint Helens	Decite
Ruapehu	Andesite

오염 증가량이 상대적으로 크지 않았으며, 방사성 원소인 스트론튬은 철과 비슷한 증가율을 나타냈다.

Figs. 2~9는 화산재 위험평가 모델결과로 성분별 화산재 퇴적량에 따른 오염농도의 증가를 나타낸 것이다. 현

Table 5. Standards of Domestic Hazard Exposure for Volcanic Chemical Compositions

Volcanic chemical composition	Hazard exposure standard (mg/kg)	Density comparison strip on Pacaya ash (time)	Density comparison strip on Fuego ash (time)
Mn	0.068	14.7	21.7
Pb	0.009	1.5	11.5
Cd	0.001	56	8
Cl	0.007	29142.8	17714.3
Cu	0.011	1240	29.4
U	0.001	0.08	1.1
V	0.006	4.1	10

Table 6. Predicted Increases in Receiving Water Concentration from Volcanic Ashfall using Fuego Cash Values for the Paldang Dam Basin

Element	Drinking water quality standard	Cwater (mg/L) in 0.1 mm		Cwater (mg/L) in 1 mm		Cwater (mg/L) in 5 mm		Cwater (mg/L) in 10 mm	
		Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
Al	0.20	0.001	0.005	0.011	0.054	0.053	0.272	0.105	0.543
Cd	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Cl	250	0.025	0.047	0.251	0.470	1.257	2.352	2.514	4.704
F	1.50	0.004	0.018	0.043	0.178	0.215	0.892	0.430	1.784
Fe	0.30	0.000	0.005	0.004	0.045	0.021	0.227	0.042	0.454
Mg	0.30	0.004	0.009	0.045	0.089	0.223	0.446	0.446	0.892
Pb	0.01	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.010	0.002	0.019
Sr	4.00	0.000	0.001	0.004	0.011	0.020	0.053	0.041	0.105

Table 7. Predicted Increases in Receiving Water Concentration from Volcanic Ashfall using Pacaya Cash Values for the Paldang Dam Basin

Element	Drinking water quality standard	Cwater (mg/L) in 0.1 mm		Cwater (mg/L) in 1 mm		Cwater (mg/L) in 5 mm		Cwater (mg/L) in 10 mm	
		Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
Al	0.20	0.003	0.004	0.026	0.043	0.130	0.215	0.260	0.430
Cd	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003
Cl	250	0.041	0.170	0.414	1.703	2.068	8.517	4.137	17.033
F	1.50	0.006	0.009	0.058	0.089	0.292	0.446	0.584	0.892
Fe	0.30	0.001	0.002	0.006	0.019	0.028	0.093	0.057	0.187
Mg	0.30	0.004	0.011	0.040	0.105	0.199	0.527	0.397	1.054
Pb	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Sr	4.00	0.000	0.001	0.003	0.005	0.017	0.026	0.033	0.053

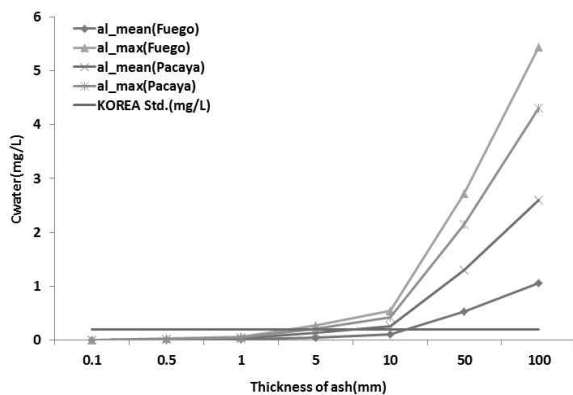


Fig. 2. Analysis of Al Concentration with Drinking Water Quality Standard

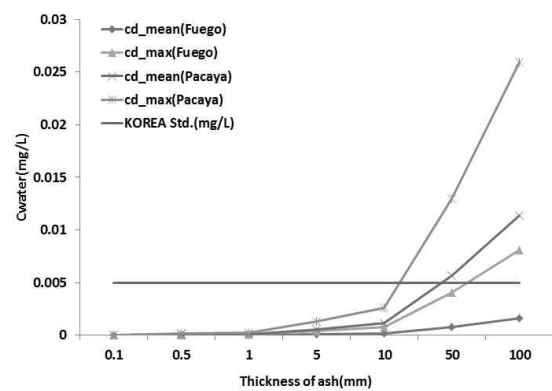


Fig. 3. Analysis of Cd Concentration with Drinking Water Quality Standard

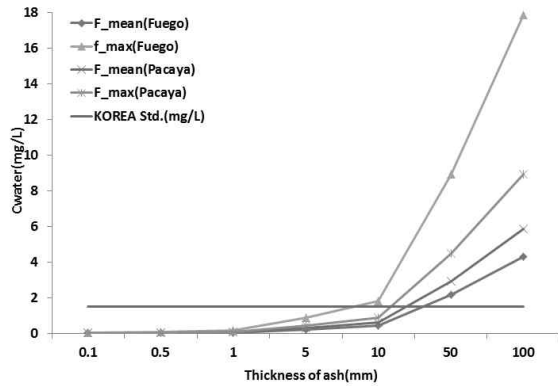


Fig. 4. Analysis of F Concentration with Drinking Water Quality Standard

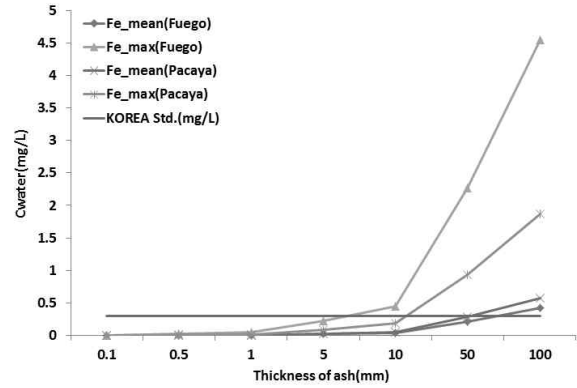


Fig. 5. Analysis of Fe Concentration with Drinking Water Quality Standard

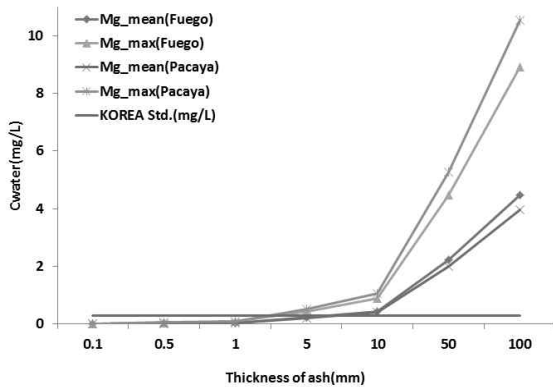


Fig. 6. Analysis of Mg Concentration with Drinking Water Quality Standard

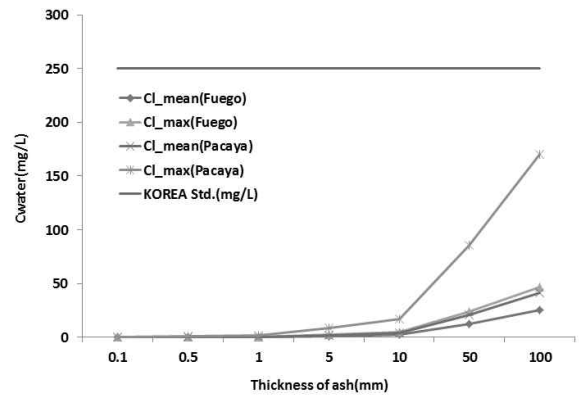


Fig. 7. Analysis of Cl Concentration with Drinking Water Quality Standard

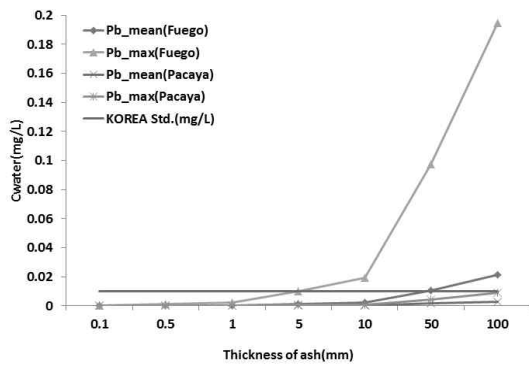


Fig. 8. Analysis of Pb Concentration with Drinking Water Quality Standard

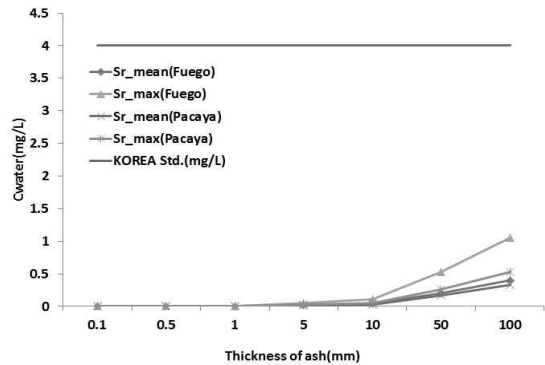


Fig. 9. Analysis of Sr Concentration with Drinking Water Quality Standard

재 우리나라의 먹는물 수질기준과 비교하여 성분별 오염 가능성 및 수질관리 위험등급을 제시하였다.

알루미늄(Al)의 분석결과, 0.1~1 mm의 화산재 퇴적두께에 대해서는 수질에 영향이 미비한 것으로 나타났다. 이후 1~5 mm 사이에 오염농도가 증가하였지만, 먹는물

수질기준 이하의 농도기 때문에 수질에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단하였다. 5~10 mm의 화산재가 퇴적되었을 경우, 먹는물 수질기준을 초과하는 단계로 이 범위 안에 화산재가 퇴적되었을 경우에 적절한 대응이 필요할 것으로 판단된다. 화산재가 10 mm 이상 퇴적되면 오염 농

도가 먹는물 수질기준을 초과하며, 오염을 가중시키기 때문에 특별한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

카드뮴(Cd)의 분석결과, 10 mm의 화산재가 퇴적되어도 수질에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다. 하지만 10 mm 이상의 농도에서 먹는물 수질기준을 초과하기 때문에 이 10 mm 이상의 화산재가 퇴적되었을 경우, 수질오염을 발생시킬 수 있다.

불소(F)와 철(Fe)의 분석결과, 알루미늄과 비슷한 경향을 보이고 있다. 0.1~5 mm의 화산재가 퇴적되어도 수질이 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다. 하지만, 5~10 mm의 화산재가 퇴적되면 먹는물 수질기준을 초과하는 것으로 나타났기 때문에 이 범위의 화산재가 퇴적되면 대응 조치가 필요할 것으로 판단된다.

납(Pb) 분석결과, Fuego 화산재 성분의 최대농도가 5 mm 이상에서 수질기준을 초과하였고, 평균농도는 50 mm 이상에서 수질기준을 초과하였다. 하지만, Pacaya 화산재의 납 성분은 100 mm의 화산재가 퇴적되었을 때 수질기준을 초과하였다. 이는 Fuego 화산의 화산재에 납 성분이 Pacaya 화산에 비해 고농도로 함유되어 있으며, 다른 화산에 비해서도 특히 Fuego 화산에 납 성분이 많이 함유되어 있다.

마그네슘(Mg) 분석결과, 화산재 퇴적두께가 1~5 mm 사이에 먹는물 수질기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 5 mm 이후에 최대값과 평균값 모두 초과하기 때문에 5 mm 이상의 화산재가 퇴적되면 수질관리 및 대응이 필요할 것으로 사료된다.

염소(Cl)와 스트론튬(Sr)의 분석결과, 두 성분은 100 mm 이상의 화산재가 퇴적되어도 수질에 대한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 염소는 자연계에 상당히 많은 양이 존재하는 원소로 높은 농도에서도 수질에 미치는 영향이 적은 것으로 사료된다. 또한 화산재 분화시 발생하는 화산재가 포함하는 염소농도가 상대적으로 고농도가 아니기 때문에 수중에 퇴적되어도 음용수 수질기준을 초과하지는 않는 것으로 판단하였다. 스트론튬은 자연계에 많이 존재하는 원소로 반응성이 크나 천연상태의 원소로는 위험성이 적은 원소이다. 화산재로 발생하는 스트론튬의 양은 매우 적은 양이며, 칼슘보다 반응성이 크고 낮은 온도에서도 반응하는 이유로 쉽게 화학반응을 일으켜 퇴적되는 양이 크지 않을 것으로 판단된다.

화산재에 따른 수질환경에 대한 영향을 평가한 결과 8 개 항목에서 수질기준을 초과한 것으로 나타났다. 1~5 mm 범위에서는 알루미늄과 마그네슘이 수질기준을 초과하였고, 5~10 mm 범위에서는 불소와 철이 수질기준을

초과하였으며, 10 mm 이상의 범위에서는 납과 카드뮴 등의 중금속이 수질기준을 초과하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 백두산 화산 폭발 시 발생할 수 있는 환경 피해를 최소화할 수 있는 수질환경 관리기준 수립을 위한 방향을 제시하고자 하였다. 이를 위해 백두산 화산재 성분을 추정하였으며 성분에 따른 위험도를 평가하기 위해 팔당댐 저수지역을 대상으로 하여 평가를 실시하였다. 팔당댐 저수지역에 대한 오염평가 결과와 국내 먹는물수질기준과의 비교를 통해 화산재 낙하에 따른 수질관리 등급 설정 방향을 제시하였으며, 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 백두산의 분화 시 발생하는 화산재의 성분을 마그마의 성분을 이용하여 추정한 결과, Fuego, Pacaya 화산의 화산재 성분과 유사한 것으로 나타났다.
- 2) 해당 화산 화산재 성분의 위험도를 분석한 결과, 표면에 산성 물질이 코팅된 화산재와 산성가스 등에서 검출된 알루미늄, 비소, 염소, 불소, 철, 수은, 납, 황산, 세슘 등이 유해성분으로 나타났다. 이와 같은 성분은 용해되어 수자원에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 수도권지역 중요 수원인 팔당댐 상수원 지역의 화산재에 대한 수질환경의 영향을 평가한 결과, 팔당댐은 오염잠재력이 취수원으로 사용하는 다른 국내 댐에 비해 오염잠재력이 큰 것으로 나타났다. 또한 영향을 미치는 화산재 성분은 알루미늄, 카드뮴, 불소, 철, 납, 마그네슘, 염소와 스트론튬으로 이들 성분의 증가는 팔당댐 저수지역 수질에 영향을 미칠 것으로 판단하였다.

화산재 퇴적량(두께)에 따른 수질의 농도변화 분석 및 이에 대한 평가는 백두산 화산폭발 시 또는 인접국가의 화산재 이동시 국내의 수질환경 변화에 대응하기 위한 판단기준으로서 활용될 것으로 판단된다.

향후 백두산 분화 시 발생할 오염물질의 확산 범위와 거리별 확산 농도, 이동 중 성분변화 등의 연구의 진행으로 화산재 확산 시뮬레이션이 포함된다면 화산재 대응을 위한 지역별, 유역별의 방재차원의 상황관리시 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 백두산 화산 대응기술개발사

업인 ‘화산재 피해 예방 및 관리기술’[NEMA-백두산-2012-2-2]과제의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Blong, R. (1984). *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Academic Press, Australia. p. 424.
- Cronin, S.J., Hedley, M.J., Neall, V.E., and Smith, R.G. (1998). “Agronomic impact of tephra fallout from the 1995 and 1996 Ruapehu volcano eruptions, New Zealand.” *Environmental Geology*, Vol. 34, No. 1, pp. 21-30.
- 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.
- Johnston, D.M. (1997a). *Physical and social impacts of past and future volcanic eruptions in New Zealand*, Unpublished Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, p. 288.
- Johnston, D.M. (1997b). *The impacts of recent falls of volcanic ash on public utilities in two communities in the United States of America*. Institute of Geological Nuclear Sciences Science Report 97/5, p.21.
- Johnston, D.M., Houghton, B.F., Neall, V.E., Ronan, K.R., and Paton, D. (2000). “Impacts of the 1945 and 1995-1996 Ruapehu eruptions, New Zealand : an example of increasing societal vulnerability.” *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 112, pp. 720-726.
- Johnston, D.M., Stewart, C., Leonard, G.S., Hoverd, J., Thordarsson, T., and Cronin, S. (2004). *Impacts of volcanic ash on water supplies in Auckland: part 1*. Institute of Geological and Nuclear Sciences Science Report 2004/25.
- Kienle, C.F. (1980). *Evaluation of eruptive activity at Mt. St. Helens, Washington-March through June, 1980*.
- Lee, S.H., Jang, E.S., and Lee, H.M. (2012). “A case analysis of volcanic ash dispersion under various volcanic explosivity index of the Mt. Baegdu.” *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 33, No. 3, pp. 280-293. (in Korean)
- Moen, W.S, and McLucas, G.B. (1980). *Mount St. Helens ash : Properties and possible uses*. Washington department of Natural Resources, Division of Geology and Earth Resources. Report of Investigation 24. p.60.
- MSF (Ministry of Strategy and Finance). (2010). 2010 Macroeconomic Stability Report. (in Korean)
- NIMR (National Institute of Meteorological Research). (2011). *Volcano Eruption Scenario of Mt. Baek-du*. (in Korean)
- NDMI (National Disaster Management Institute). (2010). *Analysis of Volcanic Ash Dispersion Due to Eruption of Mt. Baek-Du*. (in Korean)
- Scott, W.E., and McGimsey, R.G. (1994). “Character, mass, distribution, and origin of tephra-fall deposits of the 1989-1990 eruption of Redoubt volcano, south-central Alaska.” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 62. pp. 251-272.
- Smithsonian Institution. (2000). “Copahue.” *Bulletin of the Global Volcanism Network*, Vol. 25, No. 6, pp. 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*, Vol. 158, pp. 296-306.
- Weniger, B.G., Gedrose, M.B., Lippy, E.C., and Juranek, D.D. (1983). “An outbreak of waterborne Giardiasis associated with heavy water runoff due to warm water and volcanic ashfall.” *American Journal of Public Health*, Vol. 73, pp. 868-872.
- Witham, C.S., Oppenheimer, C., and Horwell, C.J. (2004). “Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods.” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 141, pp. 299-326.

논문번호: 14-006	접수: 2014.01.08
수정일자: 2014.01.14/01.21	심사완료: 2014.01.21