

일본 화산폭발로 본 화산재해



윤성효
부산대학교
지구과학교육과 교수
(사)제주화산연구소장

1. 서론

1783년~84년 아이슬란드의 라키 화산은 전 세계에 유해가스들을 확산시킨 분화를 하였다. 이것은 분화 다음해 2년 동안 유럽 전역에 서늘하고 비가 내리게 하는 원인이 되었다. 더 중요한 것은, 라키 분화는 영국에서 기근의 원인이 되어 템스강변의 교도소들에 과밀하게 수용중인 죄수들을 이동시키는 영국 의회의 1786년 결정을 재촉하게 되었다. 일 년 뒤 퍼스트 플리트(First Fleet)호는 1788년 2월에 도착할 예정으로 유형식민지인 오스트레일리아를 향하여 11척의 배에 죄수들을 싣고 출항하였다.

인도네시아 자바 근처의 순다 해협에 있는 크라카토아에서는 36,417 명이 목숨을 잃은 분화가 1883년에 발생하였다. 대기 중에 거대한 양의 이산화황을 쏟아내어 태양으로부터 들어오는 빛을 반사하는 구름을 형성하여 분화에 뒤따른 지구평균온도가 다음 5년 동안 1.2℃만큼 하락하였다. 남반구의 기후 사이클은 20년 이상동안 냉각상태가 되었다. 1883년 분화는 크라카토아가 해수면 아래 820m 침강하는 결과를 초래하였

으나, 1927년 이것은 다시 상승하였다. 물속에서 분화하는 화산들은 높은 농도의 이산화탄소가 포함된 거품이 부글부글 끓을 수 있다. 이 화산은 2007년에 분화하였고, 2009년에 또 다시 분화하였다. 서부 수마트라의 시나봉 화산이 현재 분화중이다. 자바 섬의 머라피 화산도 2010년 말에 350명 이상의 인명을 앗아갔으며 일련의 지질활동 뒤에 분화하였다. 산깡 아피 화산의 분화로 올해 5월에 다윈과 발리 사이의 항공 교통을 차단하였다. 인도네시아에는 130개의 활동적인 화산들이 있다.

지난 9월 필리핀에서 가장 활동적인 화산인 마운 산이 우르릉거리고 용암 파편을 산사면 아래쪽으로 흘러보낼 때 3만6천명 이상의 주민들이 소개되었다. 지난 8월말에는 파푸아 뉴기니의 타부르부르가 분화하였다. 이것은 1994년 분화 당시 라바울 시를 거의 다 파괴하여 도시가 코코포로 이동하게 하였다.

아이슬란드의 바르다르붕가 화산 시스템은 지난 8월 31일에 분화를 시작하여 지금도 분화중이며, 화구에서 유출된 용암류는 11월 초에는 약 70 km² 이상을 덮고 있다. 이 화산은 올해 초 6시간동안 무려 400회 이상의 지진이 감지된 후 분화가 발생하였다. 지금까지 이것은 땅에 생긴 균열을 따라 발생한 틈새분화이지만, 실제 화산은 아이슬란드의 가장 큰 빙하인 수백 미터 두께의 바트나요쿨 빙하 아래에 있다. 근처에 있는 아스카 화산 또한 대규모의 덩주요쿨 빙하 아래에 있는 데, 매우 높은 위험등급(경고)을 보이고 있다. 만약 화산 분화에 의하여 빙하를 녹이게 되면 명백하게 홍수 범람의 가능성이 있다. 2010년도의 항공 교통을 정지시킨 에이야프얄라요쿨 화산 역시 빙하 아래에서 분화하였다. 알류산 열도의 파브로프 화산도 5월 18일에 분화하였다. 북극지방과 중남미와 남미 안데스 산지에는 활동적인 화산들이 많이 분포하고 있다.

2. 일본 화산의 지체구조적 특징

일본에서는 2013년 11월에 심해에서 발생한 화산분화로 직경 200 m의 새로운 화산섬이 떠올랐다. 이 화산은 일본 도쿄의 남쪽 지진학적으로 매우 활동적인 태평양의 '불의 고리'에 속하는 오가사와라 열도의 한 부분이다.

일본은 해양(암석권)판인 태평양판과 필리핀해판이 대륙(암석권)판인 유라시아판과 북미판 아래로 해구를 통하여 침강 섭입하는 지판 경계부에 위치해 있다. 이들 판의 상호작용으로 각종 활동적인 지질활동인 지진과 화산작용이 빈번한 지역으로 일본에서 지진과 화산활동은 인간 생활을 위협하는 한 부분을 차지하고 있다. 일본은 태평양 쪽의 동일본화산대와 큐슈-오키나와 쪽의 서일본 화산대의 2개의 화산지역을 가지고 있으며, 110개의 활화산을 보유하고 있다(그림 1). 이들 활화산들 중 47개가 화산분화의 '주의' 및 '경계' 대상이다.

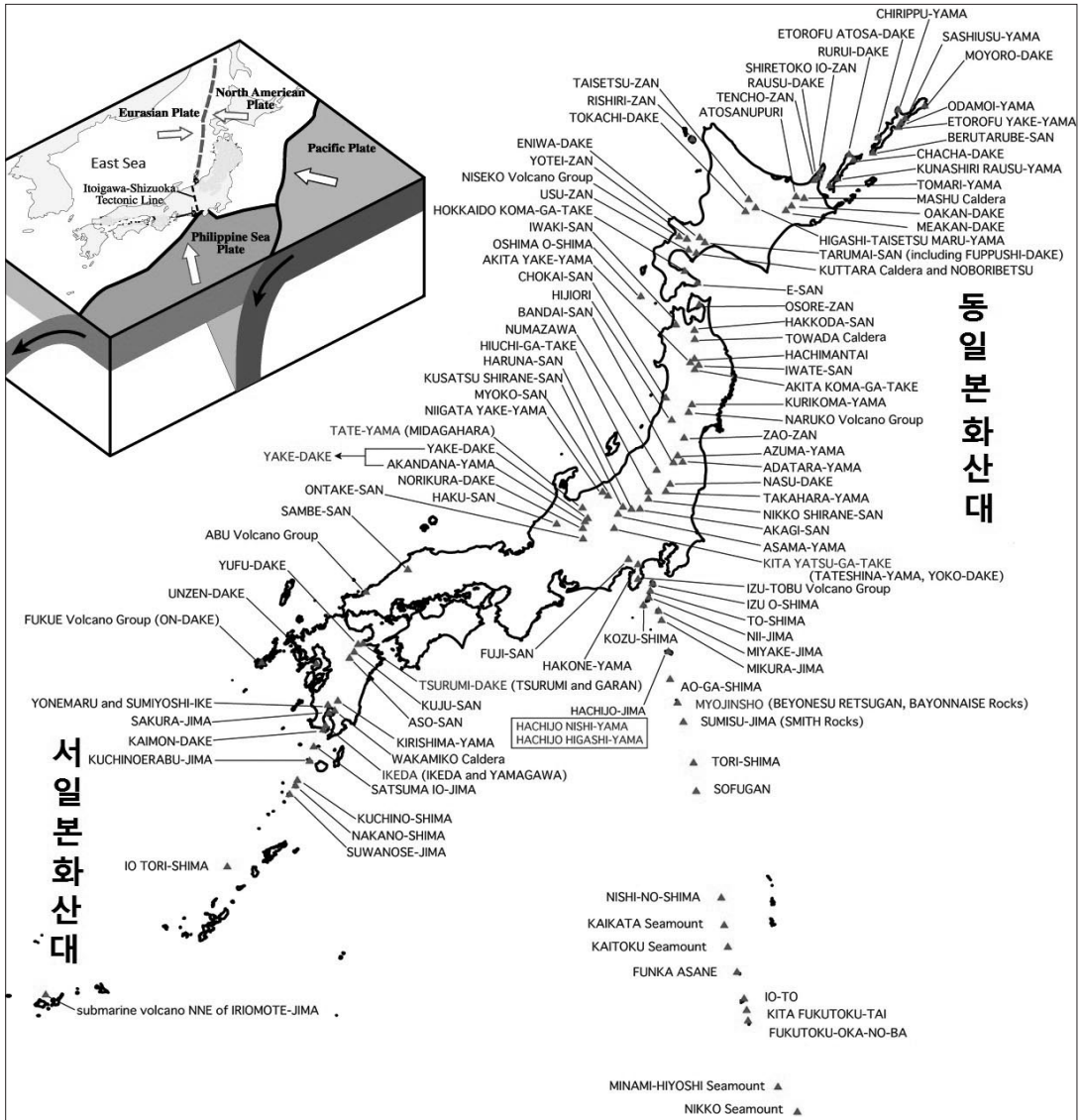


그림 1. 일본의 지체구조적 위치와 화산대의 분포

일본은 지질 재해가 빈번하게 발생하는 나라로, 최근 화산 활동의 비정상적인 양상을 보여주고 있어 주민들을 공포에 떨게 하고 있다. 연구자들은, 거의 경고가 없이 어떤 순간에 날려 버릴 준비가 된 삼페인의 진탕병처럼 이 지역에 2011년의 일본의 거대한 지진과 쓰나미 사건이 남겨져 있기 때문에, 이들 분화들을 예측하기에 점점 어려워지고 있다고 제시하였다. 지난 9월에 발생한 또 하나의 예기치 않았던 분화는 온타케(御嶽山) 화산 위에 두꺼운 화산재를 덮어 수백 명의 등산객을 기습 공격하였다. 구조대의 탐색 결과 지난 90년 이후에 일본 최대의 비극적인 화산재해로 인하여 56명의

사람들이 화산재에 덮여 질식사시켜 쓰러진 것으로 나타났다.

9월 27일에는 일본 중부의 온타케 화산이 증기, 가스들과 두꺼운 화산재를 쏟아내면서 분화하였다. 온타케 화산은 나고야 동북쪽 100 km와 도쿄 남서쪽 200km 지점의 혼슈에 위치해 있는 화산이다. 이 분화는 1902년에 대략 150명의 사망자를 낸 토리시마 화산분화 이후, 운젠 산에서 1991년 용암 돔의 붕괴로 화쇄류가 발생하여 43명의 과학자와 저널리스트가 사망한 일본에서 가장 치명적인 폭발적 화산 분화 이후 발생한 가장 최악의 치명적인 화산 분화였다. 온타케 화산 정상부 가까이 에 있던 산장 오두막에서 쏟아져 내린 화산재는 등산객들을 빠져나가지 못하게 가두어 56명이 화산재로 인한 호흡기 이상과 심폐정지 그리고 탄도 비행하여 고속으로 낙하한 분석에 타격을 받아 사망하게 하였다. 온타케 화산은 2007년 3월 하순의 아주 작은 소규모 분화 이래 최근에 처음 발생한 분화로, 사전에 뚜렷한 전조현상 없이 발생하였으며 이로 인해 많은 인명피해가 발생한 분화 사건이다. 30~40년 동안 휴면상태였던 화산이 활동을 재개할 때에는 통상적으로 24~72시간 전에는 마그마의 움직임이나 미세한 지진활동, 온천수 온도 변화, 지열 변화, 화산성 가스의 성분 변화 등의 전조현상이 나타난다. 그러나 이번 온타케 화산의 경우 이러한 특징의 전조현상이 나타나지 않고 급작스러운 분화가 발생하여 재해에 대한 대비 매뉴얼과 방재대책이 잘 수립되어 있는 일본에서조차 많은 사망자를 발생시킨 분화로 기록되었다.

지난 11월 25일부터 분화를 시작한 일본 규슈의 아소 산에서 27일 화염과 함께 화산재가 공중으로 1km 이상 높이까지 치솟았다. 이 화산재는 서쪽의 구마모토 현 뿐 아니라 동쪽의 오이타 현 30 km 지역까지 퍼져 나갔다. 화산재와 가스의 분연주가 1 km 이상까지 올라간 것은 지난 1995년 이후 20년만의 일이다. 위험할 정도로 화산재의 두꺼운 플룸은 일본 남부지역에서 상당수의 비행기 운항 취소 및 지연의 원인이 되었다. 세계에서 가장 큰 화산들 중의 하나인 아소화산의 분화는 대부분 사람이 살지 않는 시골 지역에 비처럼 쏟아지는 용암과 타는 듯한 암석들이 있기 전의 대규모 관광호황을 누리던 규슈 섬을 흔들었다. 규슈지역의 화산들은 동경으로부터 약 1,000 km 이상 떨어져 있으며, 현재까지 분화로 인한 부상이나 사망 등 어떠한 인명피해도 보고되지 않았다. 그러나 일본기상청(JMA)에 의하면, 아소 칼데라 화산은 지난 20년 이상 어떤 심각한 화산활동 양상을 보이지 않았기에, 이것은 상대적으로 예기치 않았던 폭발이었다. 작은 활동이 감지되었을 때인 화요일에 첫 번째로 '관심'이 제기되었지만, AP통신에 따르면 아소화산관측소는 불과 이틀 만에 규모가 증가할 수 있는 활동을 전혀 예측하지 못하였다고 한다. 목요일의 폭발은 하늘로 향하여 960 m 이상 두꺼운 연기와 화산재의 분연주와 비행하는 암설(암석조각)들을 날려 보냈다. 이러한 조건을 피하기 위해 비행기는 종종 지상에 붙잡혀 있거나 더 긴 경로로 항로를 변경하여야 한다. 화산재로 인하여 시정이 나빠지는 것뿐만 아니라, 심지어 화재의 위험한 엔진 고장으로 이어지는 최첨단의 제트 터빈도 타격을 받을 수 있다. 화산재경보센터들은 27일(목요일)에 비행기들을 지상에 머물도록 하였고, 승객의 안전에 의하여 여행자들의 편의를 희생하면서 29일(토요일)까지 계속 유지하였다. 일본항공

대변인은 목요일에 모든 항공편 중 12 개 항공편을 취소하였고, 큐슈 섬이나 주변의 다른 지역으로부터 새로운 목적지에서 출발 또는 회항하였다.

3. 화산재해의 다양성

화산재해는 왜 다양한 것인지, 그리고 분화를 예지하고 재해를 방지하려면 어떻게 해야 하는 것인지를 알려면, 화산현상에 대한 기초지식이 꼭 필요하다. 이 글에서는 화산분화와 그 재해를 배우는데 필요한 최소한의 정보를 소개하고자 한다.

화산 분화 유형

분화(噴火: eruption)란 화구에서 고온의 마그마 물질이나, 기존 화산체와 그 기반을 구성하고 있던 암석의 파편, 그리고 기체인 화산가스를 방출하는 현상이다. 분화 양식은 마그마가 액체 상태로 비교적 조용하게 분화구를 통하여 솟구쳐 흘러나와 용암으로 흘러가는 분출(噴出) 또는 일류(溢流)식 분화와, 순간적으로 단시간에 다량의 화산재, 부석 등을 포함하여 화성쇄설물들이 뿔어져 나오는 폭발(爆發)식 분화로 나눌 수 있다. 그리고 분화현상은 마그마의 조성이나 분출률, 화산가스의 양 등의 차이에 따라 다양하다. 그리고 분화 유형(type)은 각 화산에서 항상 같을 수 없다. 시간이 경과하면서 하나의 분화활동 간에도 분화 유형이 변할 수 있다는 것이다.

분화의 규모

화산재해의 평가를 어렵게 만드는 요인 중 하나가 분화의 크기나 빈도 그리고 지속시간이 일정하지 않은 것이다. 분화의 크기는 분출률(분출물의 단위시간(초)당 분출량(kg/s 또는 m^3/s)이나, 하나의 분화에서의 분출량으로 표현할 수 있다. 분화의 규모를 나타내는 분출량에는 통일된 기준이 없다. 방출된 화성쇄설물의 체적을 척도로 하는 경우, 마그마환산의 분출 체적 혹은 중량을 척도로 하는 경우, 그리고 마그마분출량을 방출에너지로 환산한 경우도 있다. 그리고 분화의 빈도 외에 분화가 시작해서부터 종식할 때까지의 분화 계속시간도 분화의 규모를 표현하는 척도라고 할 수 있다.

가. 분출률 : 화산에서는 마그마의 분화 세기가 시시각각 변화한다. 즉 분화에는 리듬이 있다. 그러나 분화의 세기가 점차 감소될 때, 반드시 분화의 종식에 가까워졌다고 단정할 수 없다. 일단 분화가 멈춘 것처럼 보였을 때, 분화의 발발부터 그때까지를 하나의 단계로 본다. 그대로 분화가 종식되는 경우도 있는데, 화구에서 아무것도 방출되지 않는 휴지기를 거치고 다시 분화가 시작되어 다음 단계로 이행하는 것도 있다. 이러한 분출률의 변화는 분화의 종식을 판단하는 하나의

실마리가 되지만, 절대적인 판단자료라고는 할 수 없다. 유사한 분화양식을 가진 다른 화산과 분출률을 비교하면, 그 분화 규모를 상대적으로 판단할 수 있다. 분화 시에 분출물의 추이를 정량적으로 가늠하는 것은 중요하다.

나. 분출량 : 1회의 분화의 총 분출량을 근거로 분화의 크기를 나타내는 척도로써 화산폭발지수(VEI: Volcanic Explosivity Index)와 분화 매그니튜드가 있다. 전자는 화산에서 분출한 화성쇄설물의 총량을 알면 결정할 수 있는 값으로, 0-8까지 정수로 표시한다. 예를 들면, 분출된 화성쇄설물의 총량이 1~10 km³ 내에 있으면 VEI=5가 된다. 그러나 이 지수로는 용암류 외에 다른 화성쇄설물을 분출하지 않는 하와이식 분화의 경우, 아무리 대규모 분화라도 VEI=0이 되어 버린다. 이 결함을 수정하여, 방출된 마그마의 질량으로 표현하려고 한 것이 분화 매그니튜드 M이다. 'M = log m - 7'로 나타낸다. m은 분출된 마그마의 총량을 kg으로 표시한 값이다. 그러나 화산재해 방지의 입장에서 봤을 때, 마그마 물질이 전혀 방출되지 않는, 즉, M=0인 분화에서도 기존의 산체가 대규모로 붕락하여 재해를 일으킨 케이스가 있다. 그리고 화쇄물을 방출하는 분화 쪽이 재해를 일으키기 쉽다는 경험적인 측면도 있다. 따라서 VEI와 마찬가지로 분화 매그니튜드도 분화규모를 정확하게 나타내는 척도로는 부족하다고 할 수 있다.

다. 분화의 빈도 : 세계의 화산 분화데이터 통계에 의하면, 분화와 분화의 간격에는 큰 통계적 불균형이 존재하며, 1~10년 간격으로 분화를 반복하는 화산이 가장 많다. 일본의 일부 화산에서는 분화간격에 어느 정도 규칙성이 있는 것으로 보인다. 분화간격에 대략적인 규칙성이 있는 경우는 각각의 분화양식도 유사하다. 분화의 시기와 양식의 예측이 가능한 화산은 재해대책을 세우기도 쉽다.

라. 분화의 지속시간 : 전 세계 화산 분화 데이터통계에 의하면, 분화의 지속시간은 10~100일인 것이 가장 많다. 그러나 드물게는 1만 일을 초과하는 것도 있다. 최근 일본의 분화 중에서 지속시간이 짧았던 케이스는 1983년 미야케지마의 분화로, 약 13~15시간 만에 종식되었다. 반면, 운젠 후겐다케의 1990-95년 분화와 같이 4년 이상 계속된 경우도 있으며, 사쿠라지마 화산은 1955년 이래 지금까지 계속 활동하고 있다. 이탈리아 스트롬볼리화산은 1934년 이래 현재까지 계속 활동하고 있다.

화산재해

화산 분화에 의해 발생된 재해는 여러 가지 유형으로 나눌 수 있다. 즉 용암류, 탄도비행 발사체 및 낙하 테프라, 화쇄류와 암설사태, 라하르 및 요쿨라움(빙하 홍수), 지진 및 지표 변형, 충격파와 전기방전 및 기후변동, 산성비 및 가스 등을 들 수 있다.

용암류의 약 90%는 현무암질 마그마를 포함한다. 약 8%는 안산암질, 나머지는 규산질 마그마이다. 유문암질 및 테사이트질 용암류는 현무암질 용암류보다 길이가 더 짧고 뭉툭하며, 틈새

(fissures)로부터 흘러나온 현무암질 용암류가 가장 멀리까지 퍼져나가는 경향이 있다. 실리카가 함유된 용암류의 형태학에 있어 이러한 변형에 영향을 주는 요인들에는 온도, 점성, 항복 강도 및 분출률 등이 있다.

테프라(tephra)라는 용어는 가스를 제외하고 화산 분화 중 공기로 운반되는 모든 산물을 포함한다. 그러므로 테프라는 테프라 (분석 또는 화산재) 낙하 및 화쇄류를 포함한다. 스트롬볼리식, 불간식, 썬제이식 및 플리니식 유형의 분화에서는 수직 또는 거의 수직의 분연주가 형성된다. 이러한 분연주는 높이 10~30 km 또는 그 이상까지 공중으로 계속 치솟아 오를 수 있다. 화도에 탄도비행 궤도(ballistic trajectories)를 남기는 화산탄, 화산암괴 및 화산력(화산자갈 또는 라필리)은 발사체(projectiles)라고 불린다(그림 2).

화쇄류(화성쇄설(밀도)류)라는 용어는 다음 세 가지 종류의 화산 현상을 지칭하기 위해 사용된다.

첫째, 화쇄류, 또한 열운(nuees ardentes) 또는 작열하는 사태(glowing avalanche)라고도 한다. 이것은 쇄설물질(화성쇄설물)이 지형적으로 낮은 곳에 축적되는 고온, 중력의 지배를 받아 응집된 기체-고체 화산 상태에서 지표면 위로 흐르는 것을 포함한다. 이러한 화쇄류는 솟아오르는 테프라 기둥의 대류성 추진 단계가 초기의 가스 추진 단계를 이어받지 못할 때 발생한다. 만약 공기의 유입이 주변 대기의 밀도 이하의 분연주 밀도를 유지하기에 충분하지 않다면, 대류성 추진은 불가능하게 되며, 화산의 측면 아래로 화산의 측방 운동이 중력에 의해 분연주 기둥을 붕괴시켜 화쇄류가 발생한다. 이 시점에서 불간식 또는 플리니언식 분화는 펠레식 분화가 된다. 화쇄류는 또한 활동적으로 성장하는 용암의 지표면 유출물 또는 돔의 붕괴로부터 비롯될 수 있다.

둘째, 팽창된 저농축 가스-고체 화산의 난기류성 측방운동을 포함하는 화쇄난류(또는 썬지), 난류는 낮은 지역에서 축적될 뿐 만 아니라 지표면을 덮고 있다. 그것들은 뜨겁거나 차가울 수 있다.

셋째, 화산의 일부 붕괴로부터 비롯되는 유도된 폭발로 발생할 수 있으며, 1956년 베지미아니 산과 1980



그림 2. 온타케 화산에서 튀어나온 분석 발사체들이 남긴 충격흔적(지붕에 구멍이 나있고, 화산재위에 충격흔들이 보인다. 동경대지진연구소공개자료)

년 세인트헬렌스 산 분화 방식이 이에 해당된다.

‘라하르’라는 용어는 ‘주로 화산의 기원이 되는 암설과 모가 나 있는 각상의 암괴들을 포함하는 (화산)이류’ 및 ‘물에 의해 유동되며 화산의 경사면 위에서 기인된 암석조각의 신속한 밀도류 흐름으로부터’ 기인되는 퇴적물에 대하여 자주 사용되며, 토석류, 화산이류 등으로도 불린다.

재해 관점에서, 화산 분화와 관련된 지진들은 두 가지 이유에서 중요한 의미를 가진다. 이들은 중대한 피해와 상해를 유발할 수 있으며, 분화 활동이 있기 전에 빈번하게 일어난다. 전조가 인지되는 곳에서는, 재해 충격을 개선할 척도들이 적용될 수 있다.

마그마의 휘발성 성분으로 분화 동안, 화도로부터 산성 에어로졸, 테프라 입자에 흡수된 화합물, 그리고 염 입자 형태의 세 가지 주요 방법으로 퍼져나가는 화산 가스를 형성한다. 분화가 폭발적일수록 흡수된 화합물로서 운송되는 부분은 더 많아진다. 다양한 형태의 수증기와 황은 분화 구름의 주요한 구성요소들이다. 1966년(당시에는 어떠한 분화도 일어나고 있지 않았다)과 1977년 동안 하와이 할레마우마우로부터 얻은 가스와 구름 시료들은 가스들로부터 수집된 입자들은 NH_4^{++} 와 Ca^{++} 와 같은 H^+ 뿐만 아니라 약간의 양이온들을 포함하는 95% 이상의 묽은 황산 방울들이었다. SO_2 는 황산을 형성하기 위해 대기 중에서 서서히 산화하는 아황산을 형성하기 위해 용해되기 때문에, 분화 구름 내에서 황산의 농도는 적어도 어느 정도까지는 시간과 풍하측 거리에 따라 증가할 것이다.

4. 백두산의 화산위기

우리 민족의 영산인 백두산은 동북아시아 지역에서 가장 활동적인 화산 중의 하나이며, 10세기 초 거대분화는 VEI 7급으로 지난 2,000년 이전까지 가장 격렬한 화산활동이었다. 백두산 천지 일원에서는 2002년에서 2005년까지 지하 마그마의 관입에 의한 화산성 지진의 급증 및 비정상적인 지표 변형이 발생하였다. 화산구조성 지진의 규모가 2002년 7월부터 갑자기 급증하였으며, 지진발생 빈도도 한 달에 수십 회에서 수백 회까지 증가하였으며, 2002-2003년도에는 하루에 백 여 회의 군발(群發)지진이 발생하였으며, 2003년에는 연간 2,100여 회 발생하였고, 2006년도부터는 감소하는 추세를 보여 현재에는 1999년-2001년의 수준을 유지하고 있다. 주파수가 대체로 5Hz 또는 5-10Hz의 범위에 속하는 이러한 지진들은 B-형 화산구조성 지진(VT-B)과 장주기 지진(LP)으로 지하 3~5km 천부에 위치한 마그마방 상부의 균열과 마그마의 관입에 기인하는 것이다. 2002년도부터 2009년도까지의 GPS관측에 의한 지표면의 수평변위에 의하면 2002년 이후 천지 칼데라 정상부를 중심으로 화산체가 팽창하는 것이 감지되었으며, 2002년도 대비 2003년도에는 약 4 cm 이상 이었고 2003년도 이후에 그 변화율은 감소하는 경향으로 보였다. 백두산 성층화산체 사면에서의 정

밀수준 측량에 의한 지표면의 수직적 팽창은 최대 10 cm 이상의 변위를 보였으며, 수직 변위와 수평 변위 모두 2006년도 이후 변화율은 다소 감소하는 추세를 보이나, 2009년까지 용기(팽창)하였으며, 그 이후 침강하면서 여전히 불안정한 상태를 보이고 있다. 온천에서 채취한 화산가스로부터 분석된 헬륨 동위원소비($^3\text{He}/^4\text{He}$)의 높은 값은 이들 가스들이 맨틀로부터 유래된 것임을 증명하고 있다. 천지 주변의 온천수의 온도가 69℃에서 점진적으로 증가하여 최대 83℃에 이르고 있다. 그간 비교적 큰 규모의 지진에 의한 산사태, 암벽붕괴, 화산가스에 의한 수목의 고사 등이 관찰되었고, 2011년 여름 천지 칼데라 외륜산의 절벽으로부터 수 차례의 암벽붕괴도 발생하였다. 이런 모든 현상들이 백두산 천지화산이 불안정한 상태에 있으며, 잠재적으로는 충분히 화산 분화 가능성이 있다는 것을 지시하는 것이다. 강력한 화산 감시 모니터링과 화산재해경감을 위한 사전 방재대책이 필요한 단계라고 평가된다.

백두산이 폭발적으로 분화할 경우 위에서 제시한 여러 화산재해 중 남한에 영향을 미칠 수 있는 것은 강하화산재이다. 2008년부터 2012년까지 최근 5년간의 월별 백두산 화산재 유입 가능 일의 비율을 살펴보면, 화산폭발지수(VEI) 2이면서 화산재가 3km 고도로 분화했다고 가정할 때에 9월이 30.7%로 한반도로 화산재가 확산되어 올 확률이 가장 높았고, 5월(29%), 4월(28%) 순이었다. VEI 4이면서 화산재가 10 km 고도로 분화했다고 가정할 때에는 4월달이 22.7%로 화산재가 한반도로 올 확률이 가장 높았고, 5월(21.3%), 6월(20.7%) 순이었다(그림 3). 계절별로 살펴보면, VEI 2이면서 화산재가 3km 고도로 분화했다고 가정할 때에는 봄철이 28.3%로 한반도로 올 확률이 가장 높았고, 겨울(21.3%), 가을(20.9%), 여름(20%)의 순이었다. VEI 4이면서 화산재가 10km 고도로 분화했다고 가정할 때에는 봄철이 20.4%로 한반도로 올 확률이 가장 높았고, 여름(12.8%), 가을(7.7%), 겨울(6.2%)의 순이었다(그림 4과 5).

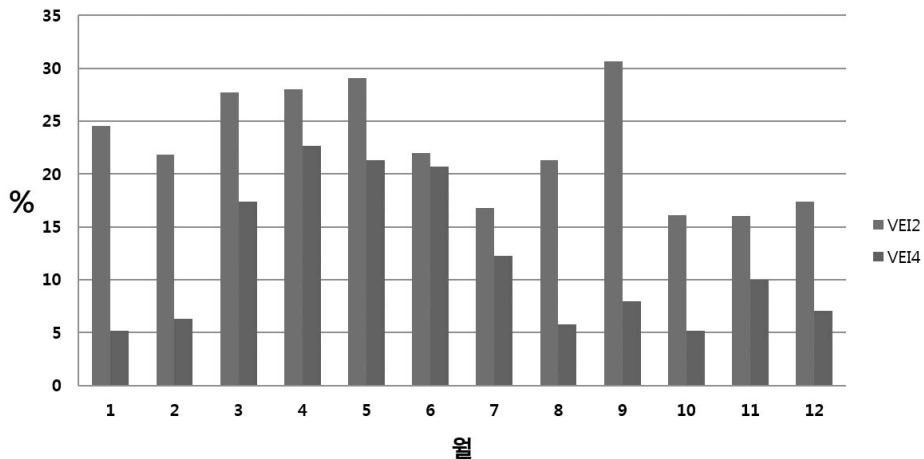


그림 3. 2008년~2012년(5년) 동안의 기상장에서 월별 백두산 화산재가 남한으로 올 확률

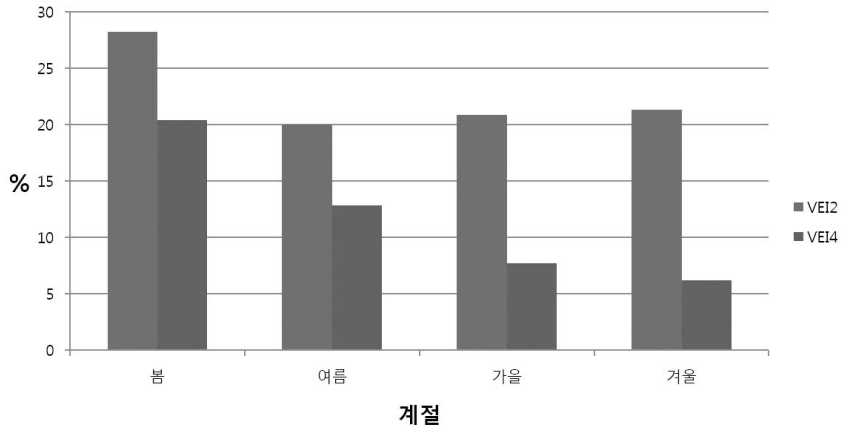


그림 4. 2008년~2012년(5년) 동안의 기상장에서 계절별 백두산 화산재가 남한으로 올 확률

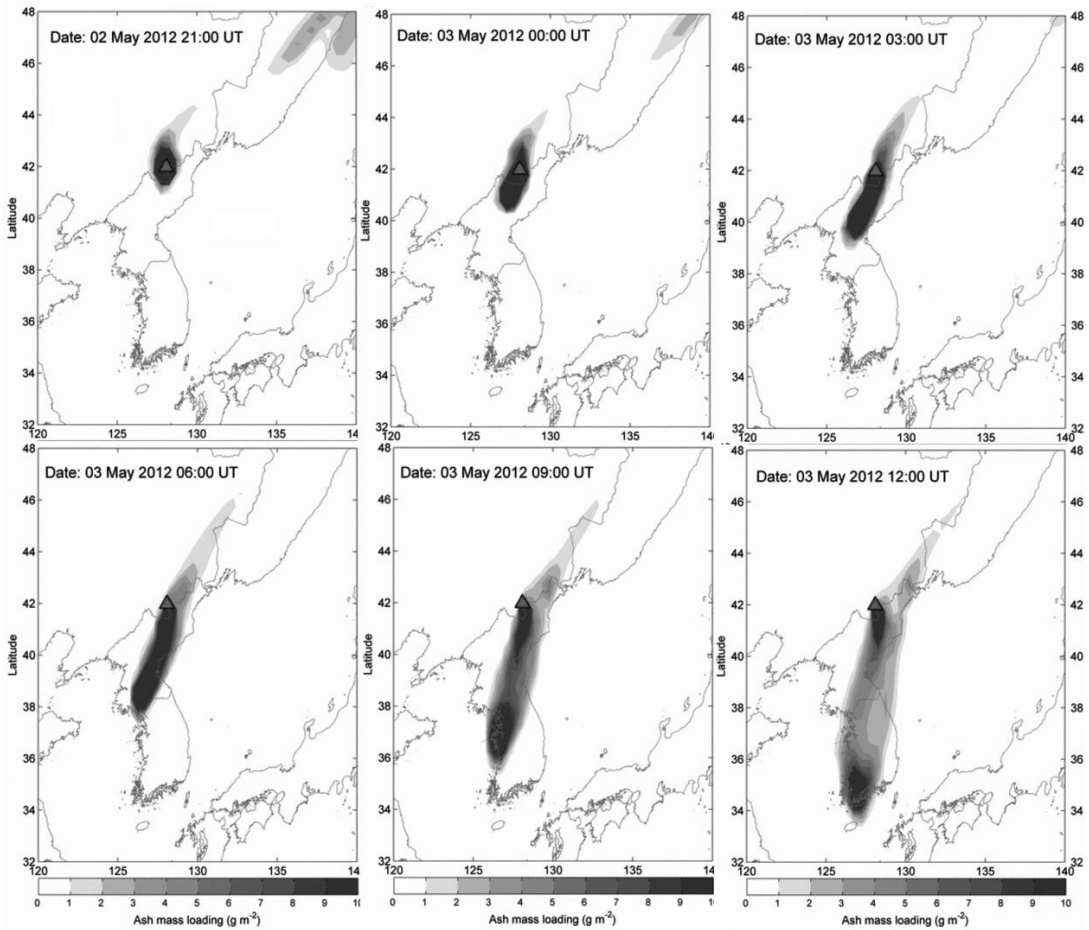


그림 5. 백두산에서 분화한 화산재가 북동기류를 타고 한반도 남쪽으로 확산 수송되는 시뮬레이션 결과(2012년 5월 2일~3일의 바람장 조건)

5. 화산재해에 대한 대처법

화산 재해를 예측하는 것이 항상 가능한 것은 아니기 때문에, 화산으로 인한 피해를 경감시키기 위한 다양한 대책들이 여러 가지 단계의 성공을 거두면서 시도되어 왔다.

백두산 주변지역

용암류 통제하기 : 용암류의 속도를 늦추거나 방향을 전환시키는 시도들은 단지 부분적인 성공을 가져왔다. 아마도 소방 호스로부터 뽑아낸 엄청난 양의 물로 용암류의 전면을 식히고 굳히는 것이 가장 효과적인 방법일 것이다. 1973년에 이러한 방법으로 아이슬란드, 헤이메이 마을과 항구로 전진하던 대형의 현무암 용암류가 식혀지고, 속도가 점차 느려졌으며 부분적으로 방향을 돌렸다. 1935년과 1942년에는 가장자리를 따라 냉각된 용암의 딱딱한 제방을 파괴하기 위하여 마우나로아로부터 분화한 용암류들에 폭탄을 투하하였다. 이런 식으로 용암류들의 경로를 다른 데로 돌리게 되었다. 하지만 그러한 시도들은 표준 절차로서 채택될 만큼 충분히 성공적이지 못했다. 하와이 서쪽 끝 부분의 카포호 근처에서 마우나로아로부터 분화한 용암의 방향을 바꾸기 위하여 1960년에는 9일 동안 비상 우회 장애물이 세워졌었다. 그 용암을 해안의 건물 재산이나 등대로부터 멀리 떨어뜨려 우회시키는 데 있어서는 어느 정도 성공적이었다. 추측컨대 제방의 부서진 암석들은 흘러가는 용암보다는 덜 촉촉하기 때문일 것이다. 현무암 용암류의 경로 상에 부서진 현무암 용암을 불도저로 밀어 만든 제방은 성공적이지 못하다는 것이 입증되었다.

화산이류(火山泥流)에 대한 경고 : 빠른 속도로 이동하는 화산이류는 화산들의 낮은 경사면에 있는 계곡들에서 살고 있는 수천 명의 생명을 앗아 간다. 자동탐지시스템들은 많은 사람들이 계곡 바닥에서 더 높은 지형 위로 대피하도록 충분한 경고를 제공할 수 있다. 활화산들의 측면의 높은 계곡에 설치되어 있는 경고시스템들은 온도 센서가 뜨거운 화산이류의 통과를 탐지했을 때 경고를 제공해 줄 수 있다. 예를 들면 뉴질랜드는 활화산인 루아페후의 측면에 위치한 스키장 경사면에서 그러한 경고 시스템을 다년간 사용했다. 두 개의 진동 센서가 레이니어 산의 각 주요 계곡들의 높은 위치에 설치되었다. 그 센서들은 다만 0.6 Hz와 20 Hz 사이의 화산이류가 이동하면서 지면을 진동시키는 진동수만을 탐지하며, 지진진동들이나 화산분화들에 의한 낮은 주파수의 것들은 제외한다. 그러나 긴박한 위협을 식별하는 모든 경고시스템들을 동원하여 사람들의 생명을 살리는 것은 겨우 첫걸음에 지나지 않는다. 큰 화산이류가 레이니어 산에서 워싱턴 주 오팅에 살고 있는 4,000명 이상의 거주자들에게 도달하는 데 걸리는 이동시간은 한 시간 미만일 것이다. 이류가 경사 아랫면의 탐지장치에 도달할 때까지, 사건의 크기가 분석되었고, 그럴싸한 잘못된 가짜 경보는 제거되고, 확실한 정보 신호가 울렸고, 거주자들에게는 도피할 수 있도록 오직 30분이 주어진다. 성공적인 대피 철수는 명백하게 적절한 시기에 발령된 경고, 위협에 대한 사람들의 이해, 그리고 즉각적인 반응에 달려 있다.

남한 지역 및 백두산 주변지역

강하화산재(降下火山灰)로부터의 대비 : 많은 양의 강하화산재는 인간에게 미세한 입자의 흡입을 포함한 몇몇의 심각한 위협을 초래한다. 분화 시 사람들은 바람이 부는 방향으로부터 직각방향으로 향하면서, 짙은 화산재 기둥으로부터 벗어나야 한다. 심지어 무거운 화산재가 비처럼 내리는(雨灰) 지역 밖에서도 공기 중 혹은 땅 위의 화산재가 심각한 건강상의 문제를 야기할 수 있다. 눈과 인후 염증을 흔히 볼 수 있다. 호흡기 질환을 가지고 있거나 기관지염, 폐기종, 천식, 또는 담배를 많이 피워서 호흡기가 손상된 사람들은 위험에 가장 심하게 노출된다. 비록 규폐증은 꾸준히 염려되어 왔지만, 질병관리본부는 건강한 사람들도 단기간 동안 화산재에 노출되면 심각한 위험에 이를 수 있다는 것을 믿지 않고 있다.

화산재에 장기간 동안 또는 집중적으로 노출되는 사람들은 공인된 고효율 방진 마스크를 써야 한다. 만약 공인된 마스크를 착용할 수 없다면, 물을 적신 천을 사용하여 호흡하는 것도 매우 좋은 방법이다. 미세한 먼지가 많은 지역에서는 콘택트렌즈보다는 고글이나 안경을 쓰는 것이 훨씬 더 좋은 방법일 것이다.

또한 강하화산재는 잠재적으로 대피와 피난을 복잡하게 만들어 교통수단에도 문제를 가져온다. 분화에 의한 강하화산재는 비와 결합되어 운전하기에 위험한 상황에 이르게 할 수 있다. 심지어 도로 위의 1mm의 미세한 화산재조차도 도로의 차선 표시나 도로 갓길이 잘 보이지 않게 할 수 있다. 화산재는 특히 습기가 있을 때에 도로를 더 미끄러운 상태로 만든다. 분화할 때 비가 내리는 것은 흔히 있는 일이다. 이러한 경우 차량의 조종장치와 제동장치 모두 약화될 것이다. 많은 양의 강하화산재가 내리면 특히 밤에 자동차의 시정을 악화시킬 수 있다. 이렇게 시야 확보가 힘들게 되면 화산재로부터의 대피를 어렵게 만들거나 불가능하게 한다. 자동차 헤드라이트도 떨어지는 화산재를 관통하지 못하기 때문에, 도로나 친숙한 도로표시도 잘 보이지 않는다. 자동차 와이퍼 날에 있는 화산재는 창유리에 굽힌 자국을 남기고 시야를 점점 더 가린다. 시야 확보가 어렵기 때문에 차의 뒷부분을 들이받는 추돌사고가 흔히 일어난다. 공기 중의 화산재 역시 자동차에 피해를 입힐 수 있다. 냉각장치를 막히게 하고 공기 여과기를 통해서 엔진으로 들어가 작동을 멈추게 한다. 암석 알갱이의 작은 파편과 거품조각과 같은 유리는 작동하는 엔진과 변속장치, 그리고 브레이크의 표면을 마모시킨다. 그러한 입자들이 공기 여과기를 막히게 하고 엔진이 과열되게 하거나 심지어 엔진고장을 초래한다. 화산재의 양이 매우 적은 상태들을 제외하고는, 자동차들은 꼭 필요할 때만 운행되어야 하고 엔진 오일과 공기 여과기는 100~1,000km마다 교체되어야 한다.

분화예지의 과제

지금까지 밝혀왔듯, 적절한 관측을 하고 있으면, 분화 전에 몇 가지 이상 현상을 파악할 수 있기 때문에, 단기적인 예지의 전망은 밝다. 그리고 오랫동안 분화를 쉬고 있는 화산도 과거 분화의 이력

이나 마그마 축적 상황을 조사하면, 분화의 규모, 양식 등을 예측할 수 있다. 그런데 이러한 연구가 더욱 진행되면, 분화의 예지와 방재가 용이하게 실현될 수 있는가 하면 그렇지 않다. 마지막으로, 분화예지에 몇몇의 중요한 과제가 있다는 것을 지적해두고 싶다.

첫째로, 분화예측연구의 성과와 화산활동 감시를 담당하는 기상청과 발생한 재난을 담당하는 국민안전처 재난관리실의 방재대책에 유효하게 활용시킬 시스템의 문제이다. 예를 들면, 백두산 화산에서 발생한 지진이나 미동의 발생원을 아는 것은 매우 중요한데, 진원 결정능력을 가진 관측망이 설치되어 있는 화산은 우리에게도 요원하다(백두산은 중국측과 북한측이 설치). 지진 이외의 전자기나 지각변동, 화산가스 등의 관측에 이르러서는 그 유효성이 보인지 오래되었지만, 대부분 실시되고 있지 않은 것이 현실적이다. 물론 백두산에 이러한 관측을 강화하는 데에는 많은 비용이 들기 때문에, 어느 정도 투자를 할지는 정치적 선택에 맡겨야 한다. 그리고 분화가 시작된 후에 어느 정도 규모의 분화가 될 것인지, 분화가 언제 종식될 지 등을 예측하기 위해서는 과거 지각변동 데이터가 필요한데, 이 관측도 부분적으로 실시하고 있을 뿐이다. 백두산과 제주도, 울릉도에 대한 계획적인 관측을 실시할 필요가 있다.

두 번째 과제는 화산분화의 잠재력과 화산재해의 위험을 적정하게 평가하고, 그 결과를 방재대책에 살리는 것이다. 화산재해의 위험을 적정하게 평가하려면, 과거의 분화활동 이력이나 현재의 상황을 조사할 필요가 있는데, 예를 들어 과거 1만 년 동안의 활동력이나 현재의 활동 상황이 밝혀져 있는 화산은 국내에서 백두산, 한라산(제주도), 울릉도로 한정되어 있다. 이러한 자료가 있는 것과 없는 것은 분화 예측이나 방재대책을 세울 때, 큰 차이가 있다. 이러한 조사가 좀 더 사회적으로 평가되어, 지열개발을 위해서 만이 아니라, 화산방재를 목적으로 한 조사가 이들 화산을 대상으로 실시되었으면 한다. 백두산 주변의 화산재해예측도 작성이 현재 진행 중에 있다. 이 작업에는 화산학자도 협력하고 있으며, 연구 성과를 방재에 피드백 시키는 하나의 형태로써 주목받고 있다. 위험이 평가되면, 그 다음에는 얼마나 그 위험에 대응할 것인지를 검토할 필요가 있다. 예를 들면, 장기적인 시점에서 교통망이나 통신망의 배치를 고려한다든지, 토지이용이나 도시계획을 위험으로부터 피할 수 있는 방안을 강화하는 것 등을 과제로 들 수 있다.

세 번째 과제는 화산에 관한 교육 문제이다. 행정기관의 방재담당자나 보도기관의 관계자의 화산에 대한 지식은 충분하지 않다. 방재나 보도와 관련하여, 화산활동과 그것이 가져오는 재해에 대한 지식습득은 불가결한데, 이러한 문제는 그들만의 책임이 아닌 현재 교육실정과 깊은 관계가 있다는 것이다. 현재 우리나라에서는 지진이나 화산에 대해 학습할 기회가 매우 적다. 물론 초등학교와 중학교 교과서에 화산이 소개되고, 고등학교 지구과학 교과서에는 지진이나 화산에 대한 것들이 나오지만, 대부분의 고등학생은 지구과학을 선택하지 않는다. 이리하여 세상에는 지진이나 화산을 모르는 국민이 나오는 것이다. 비슷한 지구과학적 현상에 의한 재해로 태풍, 폭설, 호우 등이 있는데, 이것들은 매년 발생하고, 기상예보에서도 상세히 설명해주기 때문에 자연스럽게 학습할 수 있다. 그러나

평생에 한번 일어날까 말까하는 화산분화는 그렇지 않다. 따라서 대한민국에서 태어나 자란 사람의 축복일지 모르지만, 화산재해를 포함한 자연재해의 다양한 위험이 있다는 것을 가르쳐줄 필요가 있다. 특히 방재나 보도에 관계된 사람들에게 연수 등의 방법을 통하여 화산활동과 그것이 일으키는 재해에 대한 지식을 널리 알려줄 필요가 있는 것이다.

6. 결론

우리나라에도 백두산, 한라산, 울릉도 성인봉 등이 활화산으로 분류될 수 있다. 특히 백두산은 10세기에 화산폭발지수 7의 거대한 폭발적인 분화를 했으며 역사시대 분화 기록을 30건 이상 가지고 있다. 지난 2002년 갑작스러운 지진활동 증가를 시작으로 산체의 팽창, 온천수의 수온 증가 등의 활동이 증가함으로써 백두산의 분화 가능성이 꾸준히 제기되고 있는 실정이다. 만약 백두산이 분화를 재개하여 10세기와 같은 폭발적인 분화가 일어난다면, 백두산 주변의 중국, 북한 그리고 화산재가 확산되어 이동할 수 있는 영향권에 있는 일본과 남한 등이 재해 영향 범위에 속하게 될 것이다. 엄청난 양의 화산재가 대기 중으로 유입되어 확산되면 2010년 아이슬란드 에이야프얄라요쿨 화산의 분화 때보다 훨씬 더 심각한 전 세계적 항공대란도 발생할 수 있다.

이처럼 백두산이 활동을 재개할 경우 화산 분화에 대한 정확한 분석 및 판단, 화산 분출물의 분포 및 특성 조사, 분화 진행 상황 및 향후 예측, 화산 재해 대응 등이 신속하게 이루어지지 않는다. 막대한 재산과 인명 피해를 막을 수 없게 된다. 우리나라에는 아직 몇몇 소수의 연구자 외에는 활화산에 대한 연구가 미흡하며, 분화 가능성이 있는 백두산에 대한 화산 활동 관측 장비 및 모니터링도 현실적으로는 매우 어려운 상황으로 매우 초보적인 수준이다. 또한 화산 재해가 발생할 경우 일본의 경우와 같이 검증되고 합의된 정보를 단일한 경로를 통해 정확하게 국민들에게 제공할 수 있는 대응 체계도 갖추어져야 할 것이다.

이번 일본 온타케 화산의 갑작스러운 분화와 이에 대한 일본의 신속하고 체계적인 대응을 본받아 우리나라에도 화산 분화와 그로 인해 발생 가능한 재해에 대한 정부 차원에서의 체계적인 관리 및 운영체계구축, 지진화산법의 제정 등이 다양하게 추진되고 있고, 대응 매뉴얼 작성 및 단일 정보 전달 시스템(화산대응시스템)을 체계적으로 수립하고 있다. 이러한 정부의 화산재해대응체계를 바탕으로 가장 중요한 안전장치는 국민들의 화산에 대한 이해와 선진화된 안전의식이다. 화산재해에 대한 이해와 홍보 교육을 통하여 국민들이 위험요소에 대한 안전 의식을 바르게 가질 수 있도록 많은 노력을 기울여서 화산재해를 최소화하고 동시에 안전한 사회를 만들어야 할 것이다.

사사: 본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 '화산재해 피해예측 기술개발'[과제번호(NEMA-백두산-2012-1-2)]과제의 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 감사드립니다.