백두산 화산의 1702년 강하화산재 기록에 대한 화산학적 해석

윤성효¹ · 이정현^{2*}

¹부산대학교 지구과학교육과, ²기상청 국립기상연구소

Volcanological Interpretation of Historic Record of 1702 Fallout-ash from the Mt. Baegdusan

Sung-Hyo Yun¹ and Jeong Hyun Lee^{2*}

¹Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

요약: 백두산 화산으로부터 분화된 것으로 추정되는 1702년의 역사기록을 화산학적 견지에서 고찰하였다. 분화지점인 백두산으로부터 140 km 떨어진 2 장소에서의 강하화산재의 등층후선을 설정하여 경험식에 의하여 계산된 분출물의 최소량은 1.2 km³로 1702년의 백두산 분화 사건은 화산폭발지수 5에 해당하는 대규모 분화였다. 플리니안 분화에 의한, 열기를 가진 화산재구름이 바람의 영향 하에 지면 가까이 낮은 고도로 이동하면서 강하화산재가 발생 퇴적된 것을 잘 묘사하고 있다. 향후 분화에 대비하여 역사기록에 대한 철저한 분석을 통한 화산의 특성 이해가 절실하다.

핵심어: 백두산 화산, 1702년 분화, 플리니안 분화, 강하화산재

Abstract: This study considers the historical eruption record in 1702 from the volcanological point of view, which is presumed to have occurred from Mt. Baegdusan volcano. The minimum volume of erupted materials is estimated to be 1.2 km³ when calculated with an empirical formula using an isopach line obtained from two points 140 km away from the vent. The 1702 eruption was a paroxysmal one with VEI of 5. The historical record described a deposition of wind-modified fallout ash by movement of hot ash cloud. To prepare for the future eruption, we have to analyze historical literatures and understand characteristics of volcano.

Key words: Mt. Baegdusan volcano, 1702 eruption, Plinian eruption, Wind-modified fallout ash

서 언

백두산은 신생대 올리고세에 간헐적으로 시작된 화산활동으로부터 마이오세~플라이오세의 거대한 틈새 분화에 의한 현무암 용암대지의 형성 및 플라이스토세의 중심분화에 의한 장백산 순상화산체 형성, 그 이후 후기 플라이스토세와 홀로세의 조면암질 성층화산체 형성 그리고 최후의 칼데라 형성 단계를 거치면서 만들어진 복식화산체이다(윤성효 외, 1993; Wei et al., 2007).

백두산 화산지역의 전체 화산암 분포 면적은 18,350 km²에 달하며, 장백산맥의 최고봉인 백두산 산정부의 천지 칼데라는 크라카토아형(Williams, 1941)의 함몰칼데라로서 그 내부의 천지 호수는 지름이 4.4 km × 3.37 km, 호수 면적은 9.82 km², 천지 호수면의 해발고도는 2,189 m, 최대 수심은 373 m로 알려져 있다. 천지 칼데라 호수면의 둘레는 13.11 km이며, 그 내부에는 약 20억 톤의 물이 담겨 있다. 천지 칼데라 호수는 주변을 2,500 m 이상의 외륜산들이 둘러싸고 있으며, 외륜산의 최고봉은 2,750 m의 장군봉이다(윤성효 외, 1993; 윤성효, 2011). 천지 호수를 포함하는 천지 칼데라는 지름이 약 6~7 km이고 그 내부에는 3개의 큰 분화구가 존재한다.

*Corresponding author
Tel: 070-7850-6730
E-mail: ljhyuny@korea.kr

Table 1. Historic record of volcanic eruption at the Mt. Baegdusan volcanic field

기록연대	원문 내용
939년	日本紀略 “天慶二年正月二日 甲辰春日大社鳴如擊”
946-947년	고려사세가(世家) 권지2 고려 정종 원년(946년) “是歲天鼓鳴赦.” 日本記略 “正月十四日庚子此日空中有聲如雷.”
1014-1019년	高麗史(中) “顯宗五年三月庚寅夜四方赤氣, 七年十二月丁酉四方赤氣, 八年二月癸酉赤氣如火弥天, 十年正月乙酉赤氣意天.” 東國文獻備考(上) “顯宗五年三月庚寅夜四方赤氣, 四月庚午白氣界天如匹布, 七年十二月丁酉四方赤氣, 八年二月癸酉赤氣如火弥天, 十一月己未夜白氣如練意天俄變爲赤氣, 九年正月癸亥白氣如帶亘天, 十年正月乙酉赤氣意天.”
1199-1201년	高麗史(中) “神宗二年五月南部北井水赤沸聲如牛鳴凡十餘日.” “神宗二年十月辛酉雷俄而有怪氣中黑辺赤從鵠峯出漸大弥滿京都遂雨雹黑氣下地咫尺不見人.” “神宗三年潤二月戊申四方昏溟雨土二日庚午雨土四方昏溟意日, 四年四月庚辰朔雨土.”
1401년	건문(建文) 3년 윤3월 25일(갑인)의 분화 사건: 태종1년(1401 신사 / 명 건문(建文) 3년) 윤3월 25일(갑인)에 기록 “雨炭于端州. 東北面察理使報: “端州東北間, 非烟非霧, 渾天黑暗, 有炭落地.” 封數枚以上.”
1403년	음력 1월 27일과 3월 22일의 천지 화산 분화사건: 태종3년(1403년) 음력 1월 27일(을사일)에 기록 乙巳 / “甲州地 寧怪 · 伊羅 等處, 雨半燒蕘灰, 厚一寸 五日而消.”
1405년	음력 3월 22일(기해일)에 기록(조선왕조실록 태종대왕실록 5권): 己亥 / “東北面雨灰.” 음력 2월 23일의 천지 화산 분화사건: 태종5년 음력 2월 23일(기축일)에 기록 己丑 / “雨色如灰”
1406년	영락(永樂) 4년 2월 9일(경오)의 분화 사건: 태종6년(1406 병술 / 명 영락(永樂) 4년) 2월 9일(경오) 기록 “庚午/東北面端州, 雨土凡十四日.”
1597년	10월 7일-8일의 삼수군 일대의 화산 분화 사건: 선조30년 정유년 기미일 음력 10월 2일에 기록(조선왕조실록 제29책, 선종(선조)대왕실록 93권) “咸鏡道觀察使宋言慎書狀: 去八月二十六日辰時, 三水郡境地震, 暫時而止; 二十七日未時, 又爲地震, 城子二處頽圯, 而郡越邊甌巖, 半片崩頽, 同巖底三水洞中川水色變爲白, 二十八日更變爲黃; 仁遮外堡東距五里許, 赤色土水湧出, 數日乃止; 八月二十六日辰時, 小農堡越邊北德者耳遷絕壁人不接足處, 再度有放砲之聲, 仰見則烟氣漲天, 大如數抱之石, 隨烟拆出, 飛過大山後, 不知去處; 二十七日酉時, 地震, 同絕壁, 更爲拆落, 同日亥時、子時, 地震事.”
1668년	6월 2일(음력 4월 23일 신묘일) 천지 화산 분화사건: 조선왕조실록 제37책 현종대왕실록 권지 14 기록 “咸鏡道 鏡城府 雨灰 富寧 同日 雨灰.”
1673년	5월 20일(음력 4월 28일) 천지 화산 분화사건: 조선 현종 14년 기록 “明川等地 雨灰.”
1702년	6월 3일(음력 5월 14일) 천지 화산 분화사건: 조선 숙종 28년 조선왕조실록 제 28책 숙종대왕실록 권지 36 기록(분화는 양력6월3일(음력5월14일)에 있었다고 기록) “咸鏡道富寧府, 本月十四日午時, 天地忽然晦暝, 時或黃赤, 有同烟焰, 腥臭滿室, 若在洪爐中, 人不堪熏熱, 四更後消止, 而至朝視之, 則遍野雨灰, 恰似焚蛤殼者然. 鏡城府同月同日稍晚後, 烟霧之氣, 忽自西北, 天地昏暗, 腥膻之臭, 襲人衣裾, 熏染之氣, 如在洪爐, 人皆去衣, 流汗成漿, 飛灰散落如雪, 至於寸許, 收而視之, 則皆是木皮之餘燼. 江邊諸邑, 亦皆如是, 或有特甚處”
1903년	天池釣搜 유건봉이 기록 “장백산강강지략(長白山江崗誌略)” 중 서기 1903년(淸나라 光緒 29年)의 분화과정 묘사 “--(中略)--霧時雷雨交加 衆皆噤不成聲 旋又入夜 見池中三五明星忽起忽落 條而 潑刺一聲 自空中落一火球大如輪. 水面萬千燈火直同白晝 --砲聲轟降 宛如霹靂 波浪涌起直衝斗牛 六人戰慄不敢動 --(中略)-- 半鍾余 雹落如雨 大者寸許 六人各避石下 俞與復順頭骨血出 用濕衣 褒之 又雨鍾余 東方曉亮 雲淡風清 微霧峰尖. 徐永順言之叢叢故志之.”

활동적인 화산을 모니터링 하는 방법은 첫째, 화산을 직접 육안으로 관찰하는 것이다. 중국과 북한의 국경에 위치한 백두산을 남한에서 직접 눈으로 관측하기에는 거리상으로 너무 멀고, 국제공동 연구가 실현되지 않는 한 현실적으로 어려움이 있다. 둘째로는 직접적으로 관측 장비를 설치하여 화산체를 모니터링 하는 방법인데, 백두산이 우리나라의 실효적인 영유권 내에 존재하는 영토가 아니므로 마음대로 관측장비를 설치할 수 없는 상황이다. 이 경우 원거리에서 정밀 지진계를 통한 관측이나 위성을 이용한 지표변화에 대한 원격 관측 방법의 적용이 요구된다. 셋째로는 화산의 과거 분화이력을 조사 분석하여 분화 특성과 성질을 파악함으로써 미래의 분화 가능성에 대비하는 것이다.

향후 백두산의 분화에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 과거 백두산이 분화한 역사기록에 대한 화산학적 해석 연구가 세밀하게 진행되어, 과거의 분화이력의 특성을 명확하게 규명하는 것이 선행되어야 할 것이다.

최근 들어 분화의 전조현상을 보이고 있는 백두산

은 총 10여 회의 역사시대 분화기록을 가지고 있다. 즉 939년, 946~947년, 1014~1019년, 1199~1201년, 1401년, 1403년, 1405년, 1406년, 1597년, 1668년, 1673년, 1702년, 1903년 등의 분화기록이 정신평기, 일본기략, 고려사, 조선왕조실록, 장백산강강지략 등에 남아있다(표 1)(윤성효와 최종섭, 1996).

고문서 해석의 결과에서 1702년에 백두산에서 비교적 규모가 큰 분화가 있었다고 여겨지기 때문에(町田, 1998), 조선 숙종대왕실록에 기록되어 있는 서기 1702년의 강하화산재 사건 기록에 대해 화산학적 분석을 해 보고자 한다. 이 기록은 한국, 중국, 일본의 연구자들이 모두 백두산의 분화 기록으로 해석하였다(윤성효와 최종섭, 1996; 윤성효와 이정현, 2011a, 2011b; 이정현과 윤성효, 2011; 町田, 1998; Wei et al., 2007).

1702년 분화기록

조선왕조실록 숙종대왕실록 36권, 28년(서기 1702년 임오년, 청 강희(康熙) 41년) 음력 5월 20일(신축

Fig. 1. Historic record of fallout ash deposition from 1702 eruption at the Mt. Baegdusan volcano.

일, 양력 6월 9일)에 기록되어 있는 원문의 내용(그림 1)은 다음과 같다.

“咸鏡道富寧府，本月十四日午時，天地忽然晦暝，時或黃赤，有同烟焰，腥臭滿室，若在洪爐中，人不堪熏熱，四更後消止，而至朝視之，則遍野雨灰，恰似焚蛤蜊者然。鏡城府同月同日稍晚後，烟霧之氣，忽自西北，天地昏暗，腥膻之臭，襲人衣裾，熏染之氣，如在洪爐，人皆去衣，流汗成漿，飛灰散落如雪，至於寸許，收而視之，則皆是木皮之餘燼。江邊諸邑，亦皆如是，或有特甚處”

이를 해석하면(윤성호와 최종섭, 1996) 다음과 같다.

“함경도 부령부에 이달 14일 오(午)시에 하늘과 땅이 갑자기 캄캄해졌는데, 때로 흑 누른빛이 돌기도 하면서 연기와 불꽃같은 것이 일어나는 듯하였고, 그리고 비릿한 냄새가 방에 꽂 찬 것 같기도 하였다. 큰 화로에 들어앉아 있는 듯하여 몹시 무더운 기운에 사람들이 견딜 수가 없었다. 4경이 지나서야 사라졌다. 아침에 가서보니 온 들판에 재가 내려 쌓였는데, 마치 조개껍질을 태워놓은 것 같았다.

경성부에서는 같은 달 같은 날 조금 늦은 시간에 연기와 안개 같은 기운이 서북쪽에서 갑자기 밀려오면서 하늘과 땅이 캄캄해지고 비릿한 노린내가 사람들의 옷에 스며들었으며, 몹시 무더운 기운은 큰 화로 속에 앉아 있는 듯하였다. 그리하여, 사람들 모두

가 옷을 벗어 던졌으며, 땀이 흘러 끈적끈적하였다. 흩날리던 재는 마치 눈과도 같이 산지사방에 떨어졌는데, 그 두께가 한 치(寸) 가량 되었다. 건어보니 마치 모두 나무껍질이 타다 남은 것과 같았다. 강변의 여러 고을들도 다 그러하였는데 간혹 더 심한 곳이 있었다”.

화산학적 해석

조선왕조실록(숙종대왕실록) 원문에 언급되어 있는 부령부는 백두산에서 거의 동쪽(정동방향에서 북쪽으로 약 3° 편향)으로 139 km 가량 떨어져 있으며, 경성부는 백두산에서 동남쪽(정동방향에서 남쪽으로 약 20° 편향)으로 139 km 정도 떨어진 곳에 위치한다(그림 2). 현재 청진시에서 북쪽(정북 방향에서 서쪽으로 10° 편향) 약 29 km 지점이다.

백두산에서 동쪽으로 약 140 km 떨어진 함경도 지역에서 약 3 cm 이상의 강하화산재가 발생하였다는 것으로 해석할 수 있으며, 町田와 光谷(1994)은 1702년의 강하화산재의 발생 현상을 비교적 큰 분화였다고 생각하여, 백두산 동쪽 산록에서 분포하는 백두강하부석(Baegdu fallout pumice)을 그 분출물이라고 하였다.

Fig. 2. Location of Mt. Baegdusan and sites(Buryeong and Gyeongseong) having historic records of fallout ash deposition.

화산활동 양상 분석

기록된 바에 의하면, ‘큰 화로에 들어앉아 있는 듯 하여 몹시 무더운 기운에 사람들이 견딜 수가 없었다.’, ‘몹시 무더운 기운은 큰 화로 속에 앉아 있는 듯하였다.’와 같이 백두산에서 약 140 km 정도 떨어진 곳까지 열기를 가진 화산재 구름이 바람의 영향 하에 지면 가까이 낮은 고도로 운반되어 열기가 전해졌으며, ‘4경이 지나서야 사라졌다’라는 것에서 이러한 열기가 16시간 동안이나 지속되었음을 알 수 있다.

또한 ‘하늘과 땅이 갑자기 캄캄해졌는데’, ‘연기와 안개 같은 기운이 서북쪽에서 갑자기 밀려오면서 하늘과 땅이 캄캄해지고’와 같은 표현에서 고속의 바람에 의해 운반되는 의한 거대한 화산재 구름의 형성을 추정할 수 있다. ‘아침에 가서보니 온 들판에 재가 내려 쌓였는데, 마치 조개껍질을 태워놓은 것 같았다’, ‘홀날리던 재는 마치 눈과도 같이 산지사방에 떨어졌는데, 그 높이가 한 치 가량 되었다’의 표현에서 이동하던 화산재구름으로부터 낙하한 강하화산재가 퇴적되었으며, 그 높이가 약 3 cm 정도 되었음을 알 수 있다.

즉 백두산의 폭발적 분화로 인해 분연주에서 발생한 화산재 구름이 형성되었고, 열기를 가진 화산재 구름이 바람의 영향 하에 지면 가까이 낮은 고도로 남동쪽과 동쪽으로 고속으로 이동하면서 그 열기를 전파하고 강하화산재를 발생시켰는데, 14일 오전 11시~오후 1시 사이에 시작된 것이 4경이 지나서 즉 다음날 새벽 3시경에 사라졌다는 것은 그 지속이 16시간 동안이나 계속되었으며, 고온의 화산재 구름 급습으로 인하여 혼열을 견딜 수 없을 정도로 뜨거운 열기가 전해진 것으로 파악된다.

이러한 것으로 볼 때, 백두산에서 약 140 km나 떨어진 부령부나 경성부에 이러한 현상이 나타날 정도의 화산 분화라면, 백두산의 1702년의 분화는 플리니식의 폭발적인 분화였으며, 이 폭발적인 분화(소원주와 윤성효, 1999)에 수반하여 분연주로부터 만들어진 고온의 화산재 구름(ash cloud)이 함께 이동하면서 뜨거운 강하화산재의 낙하(ash-fall)와 같은 현상이 나타났음을 알 수 있다.

화산폭발지수(Volcanic Explosivity Index: VEI)와 분화물의 양

화산의 분화 규모를 나타내는 지표로서 화산폭발지수(Newhall and Self, 1982)가 사용되는 경우가 많

으며, VEI는 화산생성물의 부피, 분연주의 높이, 통상적인 분화 특성 관찰(즉 조용한(gentle) 분화에서부터 엄청나게 거대한(mega-colossal) 분화까지의)을 기준으로 결정한다. 통상 0에서 8까지 9단계로 나누어지며, VEI-0은 폭발적인 분화가 아니고(non-explosive), 하와이 킬라웨아 화산의 용암 분출상과 같이 용암 분출을 위주로 활동하는 비교적 조용한 분화에 해당한다. 이 때 뿜어져 나온 테프라(tephra) 분출물의 양은 10,000 m³ 이하로 정의된다. VEI-8은 분연주의 높이가 40 km 이상이며, 뿜어져 나온 테프라의 양이 1,000 km³ 이상에 해당하는 엄청나게 거대한 분화에 해당한다. VEI-1에서 8까지에서 이들 등급 간의 급간은 지수 관계이며, 한 등급 차이는 관찰되는 폭발적인 분화의 근거가 10배의 차이가 난다. 단 VEI-1은 VEI-0에 비하여 100배에 해당하는 폭발적인 분화이다. 화산생성물의 부피를 계산할 때 화산재, 화산탄, 이그니브라이트(화쇄류) 등 모두 같이 취급하며, 분출물의 밀도나 다공성(vesicularity)은 고려하지 않는다. 반면 DRE(dense-rock equivalent)는 실제 분화된 마그마의 양에 해당한다.

일반적으로 VEI-4 이상의 분화는 규모가 큰(large) 분화로 인식된다.

VEI와 분화물의 양(E) 사이에는 $VEI = \log E - 4$ 의 관계가 있다고 보고(下鶴 외, 1995)되어 있으므로, 이를 이용하여 조선왕조실록의 기록에서 해석된 1702년 분화 규모를 고찰하기 위하여 부령 경성지역에서의 강하화산재 관찰로부터 그 분화물의 양을 추정할 수 있다.

10세기 분화의 광역테프라인 백두산-토마코마이 광역테프라(B-Tm ash: Baegdusan-Tokamomai ash; Machida *et al.*, 1981, Machida and Arai, 1983)의 분포는 강한 편서풍의 영향에 의하여 동쪽으로 강하게 신장되어 있고(町田와 光谷, 1994), 백두산 화산분출물의 종류와 화산 예측 특성을 살펴보기 위한 3차원 대기역학 모형인 WRF와 입자확산모형인 FLEX-PART를 결합한 다양한 수치실험에서도 동쪽으로 확산되는 것이 뚜렷하므로(이순환과 윤성효, 2011), 여기에서 가정하는 1702년의 분화도 이것과 유사한 형태의 분포를 고려함으로써 최소분출량을 얻을 수 있다.

분출물 양의 추정

1702년의 분화에 대해 분출물의 양을 정량적으로

계산하는 것은 더 많은 요소들을 세밀하게 적용해야 할 필요가 있지만, 역사기록에 근거하여 대략적으로 그 양을 계산해 보면 다음과 같다.

백두산~부령/경성까지의 거리가 약 140 km이고, 이들 지역의 지면에 쌓인 화산재의 두께가 약 한 치(寸) 이면 약 3 cm이고, 백두산을 기점으로 한 부령과 경성 사이의 각도가 약 20°이므로, 기록에 남아 있는 두 지점을 3 cm 두께의 등층후선(等層厚線: isopach)으로 가정할 경우, 이들 사이의 지역 면적을 3 cm 두께로 화산재가 덮었을 경우의 체적은 아래와 같다.

$$\pi \times (140 \text{ km})^2 \times 0.00003 \text{ km} \times \frac{20^\circ}{360^\circ} = 0.1 \text{ km}^3$$

화산분출물의 이 체적은 화산폭발지수 4에 해당하는 분출량을 나타낸다. 그러나 Fierstein and Nathenson(1992)와 Horn and Schmincke(2000)에 의하면, 화산분출물이 퇴적되는 높이는 화구 부근에서 매우 높게 쌓이고 화구에서 멀어질수록 급격히 그 높이가 감소하다가 일정 이상의 거리에 이르게 되면 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향성에 비추어 보면, 백두산의 1702년 분화 당시 140 km 거리의 부령부와 경성부에 쌓인 화산재의 높이가 3 cm 정도라는 것은 백두산 화구 부근에는 이보다 훨씬 더 많은 양의 테프라가 쌓였을 것으로 짐작할 수 있다. 따라서 화산폭발지수가 최소 4~5 이상이었다고 추정할 수 있다.

좀 더 정확한 분출물의 양을 계산하기 위해서는 수평적인 바람장(horizontal wind field), 수평 확산 상수(horizontal diffusion coefficient), i 번째 입자 그룹의 강하 속도(settling velocity of the i -th particle class), i 번째 그룹의 원천 함수(source function for the i -th class) 등 더 많은 인자들을 필요로 한다(Pfeiffer *et al.*, 2005). 그러나 현재 1702년의 역사 기록 자료에서는 이들에 대한 단서를 찾을 수 없다. 따라서 앞으로 보다 더 많은 역사기록 자료를 발굴하여 보다 더 정확한 분출물의 양을 계산해 낼 필요가 있다.

1702년의 역사기록에서 얻은 정보는 분출원인 백두산 천지화산으로부터 약 140 km 떨어진 한 두 지점에서 관찰한 제한된 강하화산재의 두께인데, Hayakawa(1985)의 테프라 분포와 분출량 사이의 경험식인 $V = 12.2 \times T \cdot S$ (V : 분출량, T : 어떤 관찰 지점의 강하화산재 층의 두께(층후), S : 두께 T 의 등층후

Fig. 3. Relation between the areas enclosed by isopachs, S , and the thickness, T , for the Mt. Baegdusan 1702 fallout ash(this study) and for some Plinian deposits in Japan (Hayakawa, 1985). The dotted lines are isopach volume lines assuming $V=12.2TS$ (after Hayakawa, 1985)

선이 둘러싼 테프라 분포 면적)를 사용하면, 비록 한 두 지점에 한정된 강하화산재 양이라도, 어떤 테프라 분포면적을 가정했을 때, 최소분출량의 견적을 내는 것이 가능하다.

$$V = 12.2 \times T \cdot S = 12.2 \times 0.00003 \text{ (km)} \times (140 \text{ km})^2 \times \pi \times \frac{20^\circ}{360^\circ} = 1.2 \text{ km}^3$$

기록에서 강하화산재의 두께는 강하 직후의 두께로 생각되는 데, 지층으로 남을 경우에는 퇴적 직후부터 압밀(壓密)이나 삭박(削剝)의 효과에 의하여 감소한 것을 고려하여 분출량을 가늠하면 $1 \sim 10 \text{ km}^3$ ($10^9 \sim 10^{10} \text{ m}^3$)의 범위가 되며, 이는 VEI 5의 매우 큰(very large) 폭발적 분화에 해당한다.

Hayakawa(1985)의 강하화산재 층의 두께(층후)와 두께 T 의 등층후선이 둘러싼 테프라 분포 면적과의 상관 그래프(그림 3)에서도 등층후선의 두께 3 cm, 분포면적 3,419 km^2 를 고려하면 분출물의 최소량은 1 km^3 이상으로 추정된다. 즉 VEI 5에 해당한다.

토 의

朴建과 林權默 (2010)은 고문서와 백두산 동사면에 서의 2개의 노두 해석을 통해, 백두산 역사시대의 분화를 10세기 이전의 분화를 포함하여 총 7회로 결론지었다. 10세기 이후 5회의 분화는 1403년(갈색 화산재층), 1597년(검은색 화산재층), 1668년(황갈색 화산재층), 1702년(황회색 강하부석층), 1903년(화성쇄설층)이다. 이 중 1597년의 분화는 규장길 용결응회암의 분출로, 압록강 계곡 사이에 화쇄류가 되어 흐른 것으로 추정하였다. 그리고 『이조실록』에도 기술되어 있는 1702년 분화는 강하 부석층을 퇴적시킨 비교적 대규모 분화였다고 추정하고 있다. 町田와 光谷(1994)도 10세기 이후 1702년에 대규모 분화활동이 있었던 것을 논하고 있다. 중국에서는 1668년, 1702년, 1903년을 10세기 이후의 분화 연대로 추정하고 있다.

이 논의들에 대해 宮本 외(2010)는 2005년에 백두산 동쪽 두만강 북쪽의 원지(圓池)라는 호수바닥에서 채집한 코어자료를 토대로 10세기 이후 분화사의 재검토를 제기하였다. 원지는 천지칼데라에서 정동쪽으로 31 km 떨어진 지점에 위치한다. 이 호수바닥 코어자료의 해석결과를 통해서, 10세기 이후에 대량의 화산재를 일으킨 분화를 암시하는 흔적을 찾을 수 없었다는 것이 밝혀졌다고 주장하였다. 그렇다면 『이조실록』에 기술되어있는 1702년 분화는 없었던 것일까? 그들은 서기 1702년의 기술이 백두화산분화를 나타내는 것이 아니라 한반도 동해안 주변에 있었던 별도의 자연현상, 예를 들면, 산불현상도 그 후보 중 하나이지 않을까 하고 생각하고 있다. 어찌되었든 호수바닥 코어자료의 해석을 통해, 지금까지 1702년 분출물로 알려져 있던 것은 10세기 대분화의 분출물이며, 그 이후 백두산에서는 분출량이 1 km^3 에 달하는 규모의 큰 분화가 일어나지 않았다고 결론짓고 있다. 한편, 화구 부근의 테프라 분포와 그 발생빈도는 향후 과제인데, 분출량이 10^6 m^3 을 넘지 않는 정도의 소규모 분화는 있었다고 보고 있다.

이들의 논의에 대하여 우선, 1702년의 기록이 백두산 화산지역에서 발생한 화산 분화의 영향이 아니고, 주변지역에서의 산불현상이었다면 주민들이 재빨리 대피하지 않고 왜 방안에 들어 앉아 있었을 것인가를 생각해 보아야 한다. 통상 산불의 이동은 바람을 타고 빠른 속도로 이동하므로 산불현상에 의한 열기를 느꼈다면 주민 대피령이 내려졌을 것이며, 산불에 의

한 피해 상황이 보고되었을 것인데 이에 대한 언급이 전혀 없다. 그러므로 산불과 같은 자연현상이라는 주장은 과학적 근거가 매우 희박한 것이라 볼 수 있다. 그리고 원지에서의 호수퇴적물 코어자료에서 1702년 분화산물을 찾을 수 없었기 때문에 백두산에서는 분출량이 1 km^3 에 달하는 규모의 큰 분화가 일어나지 않았다고 주장하는 것은 1702년 6월 초순에 백두산 지역의 탁월풍의 풍향이 서풍임을 가정하여 화산분출물이 정동향으로 이동하는 것을 생각하였으나, 기록된 바와 같이 바람이 북서쪽과 서쪽에서 불어 왔으므로 백두산으로부터 동남쪽으로 치우쳐 동쪽으로 화산재 구름이 진행하였다면 당연히 원지 지역에는 많은 강하화산재의 낙하가 발생하지 않을 수도 있다. 중위도 지역에서 편서풍은 동쪽으로 이동하면서 저위도 쪽으로 하강하였다가 다시 고위도 쪽으로 상승하면서 파동의 형태로 이동하기 때문이다(안중배 외, 2009).

윤성호 외(2011)는 강하화산재를 발생시킨 것을 화쇄난류(pyroclastic surge: Calder et al., 1999; Blousov et al., 2002)로 해석하였으나, 화쇄난류는 대개 수십 km 이내의 거리 밖에 이동하지 못하므로 백두산에서 140 km 떨어진 지역에 나타난 열기를 화쇄난류로 해석하는 것에 어려움이 있다. 이는 분화구에서 발생한 열기를 가진 화산재 구름이 바람의 영향 하에 낮은 고도로 운반된, 즉 바람에 의해 수정된 강하화산재(wind-modified fall)로 해석할 수 있다(Scasso et al., 1994; Wilson and Hildreth, 1998).

그러므로 백두산 동쪽 약 140 km 지점에 3 cm의 강하화산재의 등층후선을 고려하면, 이 강하화산재는 백두산 천지 칼데라 내의 분화구에서 유래하여 열기를 가진 화산재 구름을 형성하여 바람의 영향 하에 지면 가까이 낮은 고도로 이동하면서 낙하 퇴적된 것으로 사료된다.

결 론

백두산은 10,000년 이내에 분화기록을 가진 활동적인 화산이며, 숙종대왕실록에 남아있는 역사기록에 근거한 백두산의 1702년 분화는 경험식에 의해 분화물의 양을 분석한 결과, 최소 1.2 km^3 로서 화산폭발지수 5에 해당하는 대분화이다. 이 분화는 플리니안 분화에 의해 분연주로부터 열기를 가진 화산재구름, 강하화산재 출현 등과 같은 현상을 수반한 대규모 화산 분화이다.

백두산의 미래 분화를 보다 정확하게 예측하고 그에 수반된 화산 재해를 효과적으로 대비하기 위해서 백두산의 과거 분화 기록을 더 많이 발굴하고, 이를 과학적으로 분석하여 백두산 화산의 분화 특성을 명확히 규명해야 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER-2011-5210)의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문을 읽고 건설적인 비평을 주시고 문장을 개선해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 朴 建, 林權默, 2010, 白頭山火山의 歷史時代噴火について, 白頭山火山とその周邊地域の地球化學(谷口宏充 編), 東北アジア研究センター叢書, 41, 113-122.
- 소원주, 윤성호, 1999, 백두산 화산의 홀로세 대분화 연구: 개관, 한국지구과학회지, 20(5), 534-543.
- 안중배, 김 준, 류찬수, 박선기, 서명석, 이화운, 정일웅, 정형빈, 2009, 대기과학, 시그마프레스, 255-256, 602p.
- 윤성호, 원종관, 이문원, 1993, 백두산 일원의 신생대 화산활동과 화산암류의 특성 고찰, 지질학회지, 29(3), 291-307.
- 윤성호, 2011, 백두산 대폭발의 날, 해맞이출판사,
- 윤성호, 이정현, 2011a, 백두산 화산의 1702년 분화 기록에 대한 화산학적 해석 연구. 2011년 한국지구과학회 춘계학술발표회 논문집(초록), 공주 공주대학교, 4월 15일, 23-24.
- 윤성호, 이정현, 2011b, 백두산 천지화산의 1702년 분화 기록 해석. 2011년 춘계 지질과학기술 공동학술대회논문집(초록), 목포 신안비치호텔, 4월 27-29일, 119p.
- 윤성호, 이정현, 정희운, 2011, 백두산 화산의 1702년 분화 기록에 대한 해석 연구. 2011 추계지질과학연합 학술발표회 초록집(초록), 제주 국제컨벤션센터, 10월 26-29일, 172p.
- 윤성호, 최종섭, 1996, 백두산 천지 칼데라 화산의 역사 분출기록. 한국지구과학회지 17, 376-382.
- 이순환, 윤성호, 2011, 백두산 화산분출물 확산 예측에 대기흐름장 평균화가 미치는 영향, 한국지구과학회지, 32(4), 360-372.
- Belousov, A., Voight, B., Belousov, M. and Petukhin, A., 2002, Pyroclastic surges and flows from the 8-10 May 1997 explosive eruption of Benymiany volcano, Kamchatka, Russia, Bulletin of Volcanology 64, 455-471.
- Calder, E.S., Cole, P.D., Dade, W.B., Druitt, T.H., Hoblitt, R.P., Huppert, H.E., Ritchie, L., Sparks, R.S.J. and Young, S.R., 1999, Mobility of pyroclastic flows and surges, at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, Geophysical Research Letters, 26(5), 537-540.
- Fierstein J, and Nathenson M., 1992, Another look at the calculation of fallout tephra volumes. Bulletin of Volcanology, 54, 156-167.
- Hayakawa, Y., 1985, Pyroclastic geology of Towada volcano. Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 60, 507-592.
- Horn, S. and Schmincke, H.-U., 2000, "Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD". Bulletin of Volcanology, 61(8), 537-555.
- 町田洋・新井房夫・森脇廣, 1981, 日本海を渡ってきたテフラ. 科學, 51, 562-569.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late Quaternary eruptions. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 18, 151-164.
- 町田洋・光谷拓實, 1994, 中國・北朝鮮國境における長白山の噴火年代に關する樹木年輪年代學的研究(中間報告). 地學雜誌, 103, 424-425.
- 町田洋, 1998, 寫眞でみる火山の自然史. 東京大學出版會, 119-128.
- 宮本毅, 菅野均志, 奥野充, 那須浩郎, Miroslaw Makhonienko, 2010, 白頭山 10世紀巨大噴火以降の噴火史の再検討, 白頭山火山とその周邊地域の地球化學(谷口宏充 編), 東北アジア研究センター叢書, 41, 123-141.
- Newhall, C.G. and Self, S., 1982, The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. Journal of Geophysical Research 87, 1231-1238.
- Pfeiffer, T., Costa, A. and Macedonio, G., 2005, A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 140, 273-294.
- Scasso, R.A., Corbella, H. and Tiberti, P., 1994, Sedimentological analysis of the tephra from the 12-15 August 1991 eruption of Hudson volcano, Bulletin of Volcanology, 56, 121-132.
- 下鶴太輔, 荒牧重雄, 井田喜明, 1995, 火山の事典, 583p.
- Wei, H., Taniguchi, H., Miyamoto, T., and Jin, B., 2007, Stratigraphic sequences and magmatic cycles of Tianchi volcano, Changbaishan. The report of North East Asian Studies, 11, 173-194.
- Wei, H., Wang, Y., Jin, J., Gao, L., Yun, S.-H., Jin, B., 2007, Timeless and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China, Lithos, 96, 315-324.
- Williams, H., 1941, Calderas and their origin, California University Publication Geological Science, 25, 239-346.
- Wilson, C.T.N. and Hidreth, W., 1998 Hybrid fall deposits in the Bishop Tuff, California : A novel pyroclastic depositional mechanism, Geology, 26, 7-10.

2011년 11월 22일 접수

2011년 12월 7일 심사개시

2011년 12월 25일 채택