

# 화산재에 따른 국내항공교통의 영향에 대한 정량화 방안

이지선 · 윤윤진\*

한국과학기술원 건설및환경공학과

## A Quantitative Approach to the influence on the South Korean Air Transportation System in the Event of Volcanic Ash Dispersal

LEE, Jiseon · YOON, Yoonjin\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

\*Corresponding author: [yoonjin@kaist.ac.kr](mailto:yoonjin@kaist.ac.kr)

### Abstract

There has been a growing interest on the effect of volcanic eruption on the aviation safety, air travel and economy especially after the eruption of Eyjafjallajokull in Iceland. Since volcanic eruption is influential on a large geographic region, the effect usually extends to other neighboring countries. Korea also has an active volcano named Mountain Baekdu. Hence, the need to estimate in advance the quantitative impact of the potential eruption of Mt. Baekdu on South Korean air transportation system. However, previous studies with quantitative estimation were confined to the calculation of the direct economic loss from shut down of the airports, grounding of airlines, and trade deficits caused by the eruption. Therefore, this paper introduces a new approach to assess more accurate impact simultaneously considering volcanic ash dispersal and aviation routes. This approach is then applied to a virtual scenario to predict the damage to air traffic. With further development, this method can help estimate the damage in the air transportation industry in more accurate and faster ways. Prediction outcomes can also be utilized in setting up the emergency response plan for the air transportation industry and contribute to the creation of more proactive and predictive measures in the future.

**Keywords:** air transportation, estimation, Mt. Baekdu, quantitative analysis, volcanic ash

### 초록

아이슬란드 화산폭발에 따른 항공대란 이후, 화산 폭발에 따른 항공 안전, 여행 및 경제 등의 관심이 증가되고 있다. 화산폭발의 경우, 화산재 확산에 따라 폭발 지역 뿐 아니라 인근 국가의 항공교통과 산업까지도 영향을 끼친다. 국내 주변에는 활화산인 백두산이 있으며, 백두산이 폭발 했을 경우의 국내 항공교통에 미치는 피해량을 예측하여 사전에 대응할 필요가 있다. 국내에는 화산재에 대한 항공교통의 피해량을 실제로 정량화하여 피해를 예측한 연구는 공항의 폐쇄일수, 결항된 운항편수 및 무역 적자 등의 경제적 손실로만 분석하고 있다. 본 연구는 백두산 폭발에 따른 확산모형과 항공로를 결합한 정량적 피해 산출 알고리즘 도출과 가상의 시나리오를 통하여 피해량을 예측함에 그 의미가 있다. 관련 알고리즘은 시스템 개발을 통하여 항공교통 피해 예측을 보다 정확하고 신속하게 도출할 수 있을 것이다. 또한, 예측된 항공교통 피해량은

J. Korean Soc. Transp.  
Vol.34, No.4, pp.318-329 August 2016  
<http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2016.34.4.318>

pISSN : 1229-1366  
eISSN : 2234-4217

Received: 7 March 2016

Revised: 18 April 2016

Accepted: 25 August 2016

Copyright ©  
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

향후 항공교통 대응체계 수립을 위한 기초자료로서 활용이 가능할 것이며, 항공 산업의 선제적·예측적 대응방안에 기여할 수 있을 것이다.

**주요어:** 항공교통, 예측, 백두산, 정량화 분석, 화산재

## 서론

2010년 4월 14일 유럽 아이슬란드 “Eyjafjallajkull” 화산이 폭발하여 8일간 10만 편 이상의 비행기가 취소되고 1천만 명의 승객이 비행기에 탑승하지 못했다(Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic, 2010). 이로 인해 항공사들은 피해만 17억 달러 이상의 경제적 손실을 입었다(IATA press release, 2010). 국내에도 4월 15일부터 20일까지 국적항공사 및 외국 항공사 포함하여 인천공항 출·도착 여객기 총 88편이 결항되어 약 29,000명의 승객이 불편을 겪었으며, 화물운송편의 경우 총 55편이 결항되어 총 2,060톤의 화물 운송이 취소되었다(국토교통부 보도자료, 2010).

화산폭발에 따라 공중에 분출되는 화산재는 항공로와 공항 폐쇄 등의 영향을 끼친다. 국내 주변에 있는 활화산 중에는 백두산이 있으며 최근 아태 지역의 항공 교통량이 증가하는 가운데 화산폭발에 따른 화산재로 항공 산업의 많은 영향을 끼칠 것으로 예상되며, 백두산이 폭발 했을 경우 국내 항공교통에 미치는 피해정도를 예측하여 사전에 대응할 필요가 있다. 국내에도 화산재에 대한 항공교통의 피해량을 정량화하여 피해를 예측하는 연구가 수행되었으며, 공항 폐쇄 일수, 결항된 운항편수 및 무역 적자 등으로 사회·경제적 영향성 분석을 한 연구들이 있다. 본 연구에서는 백두산 폭발에 따른 항공교통에 미치는 피해정도를 항공로 기반으로 산출하는 알고리즘 도출과 가상의 시나리오를 통해 그 피해량을 예측함에 그 의미가 있다. 관련 알고리즘은 시스템을 통하여 국내항공교통 피해 예측을 보다 정확하고 신속하게 도출할 수 있을 것이다.

백두산 폭발에 따라 국내뿐 아니라 주변국인 중국과 일본 항공교통에도 피해가 발생한다. 본 연구에서는 백두산 폭발에 따른 영향성을 주변국인 중국과 일본을 제외하고 국내항공교통으로 한정하여 진행하였다. 본 논문에서의 국내항공교통이라 함은, 인천 FIR 내의 국내 공항에 이착륙하는 국적항공사 및 외국항공사를 포함하며, 특히 주요공항 4곳에서 이착륙하는 국제선 항공편으로 한정하여 피해량을 산출하였다. 피해량은 항공로별 결항된 항공편수, 결항된 항공편에 따른 피해 여객수이다. 예측된 항공교통 피해량은 향후 항공교통 대응체계 수립을 위한 기초자료로서 활용이 가능할 것이며, 항공 산업의 선제적(Proactive)·예측적(Predictive) 대응방안에 기여할 수 있을 것이다.

## 국내외 항공교통에 대한 화산재 영향성 정량화 방안 연구 동향

### 1. 화산재 취약요소 및 영향성

#### 1) 항공교통에 주는 취약요소 연구

화산분화로 인해 화산재 구름이 공중에 형성될 경우 운항중인 항공기가 직접적인 영향을 받아 심각한 피해를 초래할 수 있다. Kim K. Y. et al.(2013)은 화산분화에 따른 육상과 항공교통수단별 직간접 피해유형을 도출하여 화산분화재난의 관리기준 개발 연구를 수행하였다. 항공교통의 경우, 항공기 엔진고장, 계기이상, 항공기 정비 문제 등의 직접적인 피해와 화산재로 인한 비행제한, 결항, 공항폐쇄 등과 더불어 이로 인한 경제적 피해 등의 간접적 피해로 분류하였다.

일반적으로 화산재 농도 최소  $10^{-7} \text{kg/m}^3$ 부터 항공기 기체가 심각한 손상을 입기 시작하며, 축적된 화산재가  $1 \text{kg/m}^2$ 일 때 공항의 폐쇄가 일어난다고 보고되고 있다. 2010년 아이슬란드 화산분화로 유럽 항공업계가 크게 피해를 입은 이후 국제민간항공기구(ICAO)에서 항공기 엔진정비를 위해 화산재 농도에 따른 항공운항 관리기준인 항공운항제한지역(Fly Zone Map)을 Figure 1과 같이 제시하였다(Kim K. Y. et al., 2013).

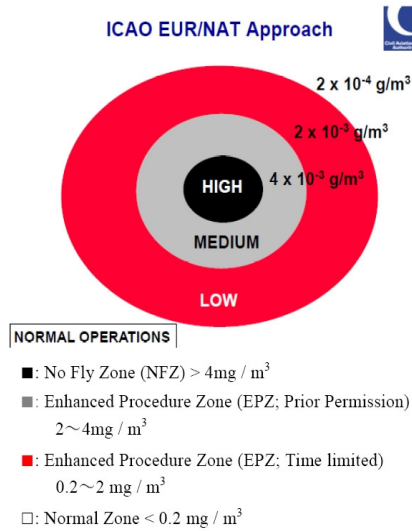


Figure 1. Volcanic concentration zone (Kim K. Y. et al., 2013)

## 2) 항공교통 피해를 초래한 주요 화산폭발 사례

항공기가 비행중 화산재 구름을 만날 경우 작은 입자의 화산재가 엔진 및 계기판에 침투해 손상을 일으켜 엔진 작동을 마비시키는 등 안전한 비행을 위협받게 된다. 이중에서도 항공교통에 피해를 입힌 대표적인 사례가 Table 1과 같이 나타난다(Boeing 2011). 1980년 미국의 Mt. St. Helens가 폭발하여, A727과 DC-8 비행기가 화산재를 만나서 2대 모두 조종석 유리창과 일부 시스템이 손상되었으나 무사히 착륙하였다. 1982년 인도네시아 Galunggung 화산이 폭발하여 B747 2대가 1달 간격으로 Galunggung 화산 부근을 지나가다 각 항공기 엔진이 피해를 받았다. 첫 번째 항공기 사고 이후 해당 구역이 임시 폐쇄되었다가 다시 오픈하면서 두 번째 사고가 발생한 것이며, 인도네시아 정부는 해당공역을 영구폐쇄하고 우회항로를 개설 하였다. 1989년, 미국의 Mt. Redoubt이 폭발하여 B747-400 항공기 엔진에 화산재가 유입되어 앵커리지에 비상착륙하여 엔진 4개를 모두 교체하고, 항공기내 및 환기 시스템의 수리 및 교체를 해야만 했다. 1991년 필리핀 피나투보 화산(Mt. Pinatubo)의 폭발은 동남아내 넓은 범위로 퍼질 만큼 큰 규모의 화산폭발이며, 20대 이상의 항공기가 화산재 구름을 만났으며, 한 미국 항공사는 수일간 마닐라의 공항에 항공기를 세워둬야만 했다(Prata, 2009).

Table 1. Significant volcanic ash events (Boeing 2011)

Year	Volcano	Country
1980	Mt. St. Helens	United States
1982	Galunggung Volcano	Indonesia
1989	Mt. Redoubt	United States
1991	Mt. Pinatubo	Philippines
2010	Mt. Eyjafjallajokull	Iceland

## 2. 국내외 연구 동향

### 1) 국내

2010년 아이슬란드 화산 폭발 이후로, 국내에도 화산재에 대한 항공교통 피해에 관한 다수의 연구가 이뤄졌다. 그러나, 국내의 연구는 과거 실제 화산 폭발 이력에 기반한 항공 산업 피해정도, 항공정책의 동향 및 대응에 대한 연구가 주로 진행되었다.

화산재에 따른 산업피해와 관련하여, Lee et al.(2014)은 농업 분야에 발생하는 직접피해액을 취약도 함수를 이용하여 계산하고 산업관련분석 모형을 이용하여 화산재로 인한 미치는 경제적 파급효과를 생산, 수입 및 부가가치 등의 세 가지 방식으로 도출한다. Kim et al.(2014)은 백두산 화산재 확산 시나리오를 기반으로 항공운항 기준에 따른 공항의 피해범위를 예상하여 항공 산업의 경제적 피해 예측을 시도 하였다. 항공 산업의 피해액은 항공사 및 공항공사의 매출규모를 활용하여 운항이 중단 될 경우의 항공사 및 공항의 경제적 피해액을 계산하였다. Jiang et al.(2013)은 해외의 대형화산의 사례분석을 기반으로 화산재 규모에 따른 사회·경제적 영향을 분석하였다. 이에 따라 화산재 해에 대비하여 한국의 실정에 맞는 화산재 예보 단표 및 화산재 예측을 위한 한국형 화산 해저드 맵 구축 필요성을 도출했다.

화산재의 산업피해 뿐 아니라 확산 모델이나 사례분석의 연구도 다수 진행되었다. Jang et al.(2013) 백두산 폭발에 따른 화산재 확산을 모델의 특성과 장단점을 분석하고 모델링을 위한 입출력 데이터를 비교하였으며, 그 중에서 Puff, Fall3D, Tephra2에 직접 적용하여 실제 모델링 결과를 도출하였다. Lee et al.(2012)은 백두산의 화산폭발지수(VEI)에 따른 확산 사례를 분화 이후 24시간, 48시간 이후의 확산 모형을 도출하였다.

주요화산폭발 사례 분석과 국외 화산재난 관리 선진국의 법령 및 제도, 대응체계 현황을 조사 및 분석하여 국내 적용 가능한 정책적·실무적 대응방안을 도출하였다(Kim, Park 2013). Park, J. H.(2013)도 화산재가 항공기 안전에 미치는 위험성을 고찰하고 인접국의 화산활동과 각국의 화산대응 활동 현황을 분석하여 국내 환경에 적합한 대응계획이 필요성을 제언했다. Hong, Baik(2010)은 미국의 911 테러 때와는 유럽의 아이슬란드 화산폭발과 같은 자연재해에 대해서는 유럽연합 및 각국에서 항공사의 지원을 하지 않음을 언급하며, 아직까지 항공법상 화산재에 대한 조항이 논의되지 않아 공급자의 손해뿐 아니라 이용하는 소비자의 권리에 대한 논의 필요성을 제기하였다.

## 2) 국외

국외에서는 가상의 화산 폭발 시나리오를 기반으로 한 항공교통 분야 피해 예측을 보다 정량적으로 하기 위하여 GIS와 VAFTAD 모델을 활용하여 직접피해를 받는 항공편의 피해량 예측을 시도하였다. Scaini et al.(2014)은 고도별 화산재 확산거리와 공항의 위치, 항공편의 이동경로 데이터를 분석해 GIS를 활용하여 공항 및 항공편 피해 규모를 예측하는 방법론을 제시하였다. 특히 공항의 경우 주변 지역의 대기 중 화산재 농도에 기반하여 항공편의 화산재 구름 영역에 들어간 항공로를 도출하여 피해량을 산출하였다. 화산재 피해는, 이용률이 높은 주요 항공로를 추출한 후 화산재 구름 영역과 겹치는 부분을 판별하여 도출하였다. Hufford(2000)은 화산재 확산모델에 관한 연구 중 VAFTAD(Volcanic Ash Forecast Transport And Dispersion) 모델을 응용하여 화산 폭발 시나리오 내에서 단일 항공로의 화산재 피해 확률 분석방안을 제시했다. 화산재 구름의 확산 영역에 오버랩된 항공로 노선 자체를 피해로 집계하는 다른 연구들과 달리 피해의 표현이 화산재와 마주할 확률에 기반하는 것이 특징이다. 국제민간항공기구(ICAO)에서 발간한 비행안전과 화산재 매뉴얼에서는 화산재에 의한 대기 오염이 예상될 때 국가가 규제기관의 감독 아래 항공운송사업자가 대응할 수 있는 권한을 주는 방안에 관한 가이드라인을 제안하였다. 그리고 비행운영의 안전성 확보와 함께 더 많은 유연성을 제공하고 화산재가 확산된 영공 일대를 비행하는 항공사의 운영 결정을 권장하였다(ICAO, 2012).

## 연구 방법

국내외 선행연구를 바탕으로, 항공교통에 대한 화산재 영향성은 화산 폭발에 따라서 계획된(scheduled) 항공편의 결항을 항공로 및 공항 폐쇄(closed) 등을 고려하여 피해량을 정량화 할 것이다. 관련 정량화 알고리즘은 데이터 베이스를 구축하여 시스템화하여 실제 화산 폭발에 따른 화산재의 영향을 보다 신속하게 대응할 수 있을 것이며, 관련 정량화 알고리즘은 Figure 2와 같이 도출된다. Input data로는 시기별 화산재 확산모형, 항공스케줄을 통하여 항공편별 항공로 매칭 정보 및 항공로와 공항의 지리정보이다. 화산 확산 모형 중에서 Figure 1의 ICAO에서 권고하는

화산재 농도( $4 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ )가 넘는 지역과 항공로 및 공항이 조우될 경우 항공로와 공항은 폐쇄되어 관련 항로와 공항을 이용하는 이착륙 항공편을 수를 파악하여 정량화된 피해량을 도출할 수 있다.

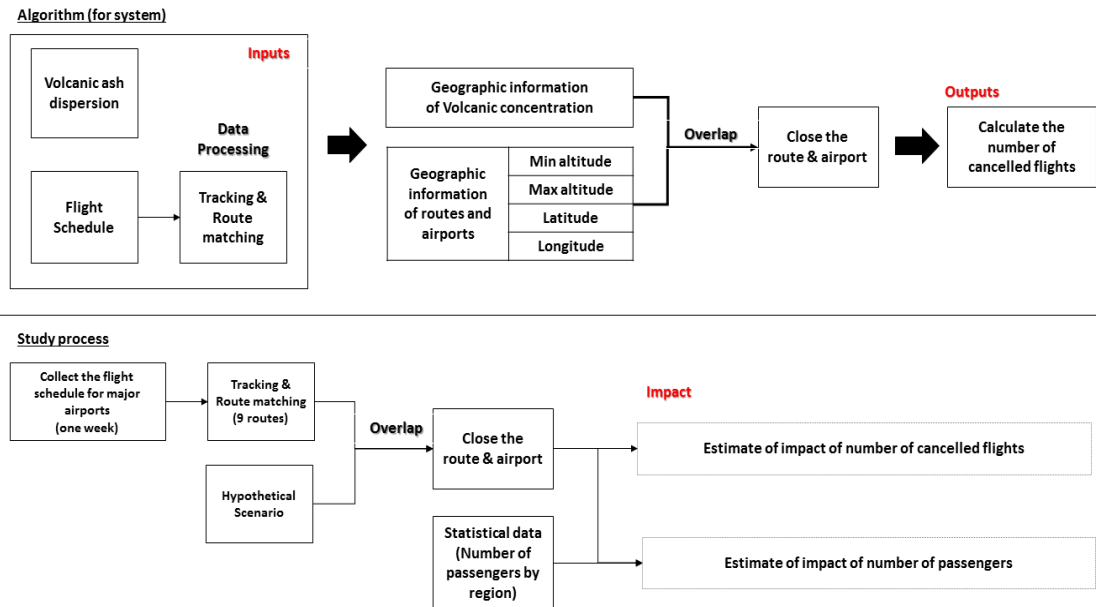


Figure 2. Quantification algorithm and study process

### 1. 시나리오 설정

Lee et al.(2012) 연구에서, 백두산 분화강도에 따른 화산재 확산 사례를 분석하였다. 2010년 10월의 21일, 화산 폭발지수(VEI) 4로 백두산이 폭발할 경우에 한반도에 유입되는 화산재의 이동을 24시간과 48시간 이후의 결과를 나타내고 있다(Figure 3). VEI 4는 2010년도 아이슬란드 화산폭발과 동일한 폭발지수이며, 화산확산 모형에서 화산재의 농도가  $4 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$  일 경우 ICAO에서는 항공로를 폐쇄해야 한다고 권고하고 있으나, Figure 3에서는 화산재의 농도 없이 화산재의 확산 모형만 알 수 있었다. 화산재 입자의 크기나 침전량은 제공하나, 본 연구에서 가정하고 있는 공간상의 농도는 알 수 없었다. 그러므로, 본 연구에서는 화산재의 확산모형을 고려하여 백두산 폭발 이후 1주일 간의 항공로 및 공항 폐쇄 시나리오를 설정 하였다. 시나리오는 국내항공현황을 분석하여 시나리오의 범위를 결정할 것이다.

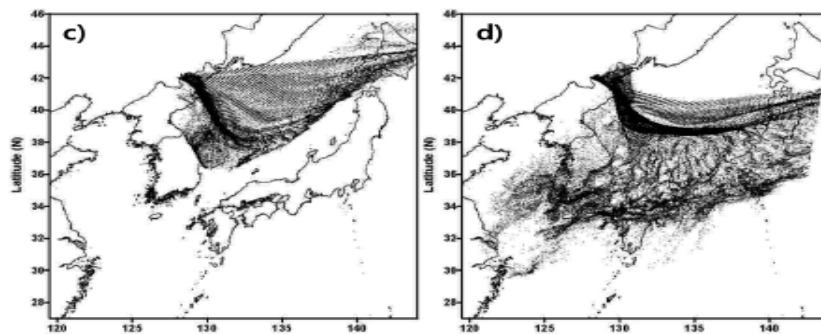


Figure 3. Distribution of particles emitted from the Mt. Baegdu under VEI 4 at 24(Left) and 48(right) hours after release, Lee et al.(2012)

## 2. 국내항공현황

### 1) 공항

현재 국내에는 15개의 공항이 있으며, 8개의 국제공항과 7개의 국내공항 중 인천국제공항은 인천국제공항공사가 관리하고 그 외 14개의 공항을 한국공항공사에서 담당하는 체제로 이루어져 있다. 그 중 인천(ICN), 김포(GMP), 김해(PUS) 및 제주공항(CJU)의 4개 주요공항이 국내의 전체 15개 공항 국제 운송량의 98%(국제운송횟수 기준)을 차지하고 있었다(Table 2). 본 연구에서는 국내항공교통을 파악한 결과, 시나리오에 적용되는 항공교통 피해량을 15개의 공항에서 4개의 주요공항의 국제항공편으로 한정하여 연구를 수행하였다.

**Table 2.** Total number of flights, passengers and rate per month for departure/arrivals (international/domestic) (2013.08)

Int. Airports	Major	ICN	Number of flights (Domestic)		Number of passengers (Domestic)		Number of flights (International)		Number of passengers (International)	
			Flights	Rate	Passengers	Rate	Flights	Rate	Passengers	Rate
Int. Airports	Major	ICN	320	2.22%	40,450	1.89%	23,457	76.29%	3,992,980	77.89%
		GMP	5,063	35.08%	740,752	34.59%	1,796	5.84%	378,799	7.39%
		PUS	1,775	12.30%	226,564	10.58%	3,346	10.88%	432,361	8.43%
		CJU	5,391	37.35%	923,832	43.14%	1,531	4.98%	239,571	4.67%
		Major airport ratio		86.94%		90.21%		97.99%		98.38%
	Others	CJJ	340	2.36%	51,310	2.40%	225	0.73%	33,010	0.64%
		TAE	333	2.31%	42,687	1.99%	154	0.50%	18,398	0.36%
		MWX	9	0.06%	618	0.03%	186	0.60%	23,911	0.47%
		YNY	0	0.00%	0	0.00%	54	0.18%	7,700	0.15%
		Others ratio		13.06%		9.79%		2.01%		1.62%
Dom. Airports	KWJ	458	3.17%	53,939	2.52%					
	RSU	251	1.74%	18,516	0.86%					
	USN	217	1.50%	17,895	0.84%					
	KPO	134	0.93%	9,516	0.44%					
	KUV	62	0.43%	8,108	0.38%					
	WJU	31	0.21%	3,574	0.17%					
	HIN	50	0.35%	3,564	0.17%					
	Others ratio		13.06%		9.79%		2.01%		1.62%	
	합계		14,434	100.00%	2,141,325	100.00%	30,749		5,126,730	

### 2) 항공로

현재 국내에는 총 38개의 항공로(국제 12개, 국내 26개)가 있으며, 항공로의 명칭은 항공로를 설계하는 과정에서 정하여 공역실무위원회와 공역위원회의 심의를 거쳐 최종적으로 결정한다. 특히 인접 국가와 연계된 항공로의 경우 항공로 명칭 중복을 피하기 위하여 국제민간항공기구(ICAO)와 전 협의를 거쳐 지정한다. Figure 4는 Google earth를 활용하여 도출하였으며, 왼쪽 그림은 현재 국내 전체의 항공로를 보여주고 있으며, 오른쪽 그림은 주요 4개의 공항과 연결되어 있는 9개 항공로를 나타낸다(B467-①, G597-②, G585-③, A582-④, A586-⑤, G203-⑥, Y711&Y722-⑦, Y644-⑧, A595-⑨).

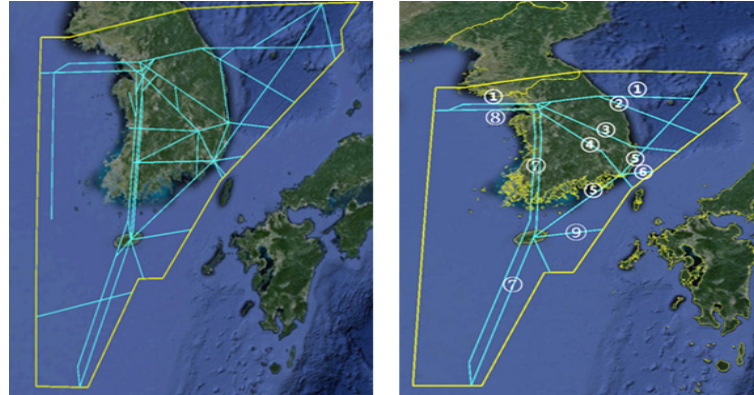


Figure 4. Air traffic routes (Google earth)

### 3. 항공로 매칭

항공편 Tracking site(www.flightaware.com) 에서 출발과 도착지역을 설정하거나, 항공편의 코드를 입력하면 전체항로를 열람할 수 있다(Figure 5). 관련 항공정보를 국내 FIR(Flight Information Region) 지역 내 국내 항공로 차트와 비교 분석하여 항공로를 매칭 할 수 있다. 인천공항(ICN)에서 싱가포르 공항(SIN)을 가는 경우 Y711 노선을 이용함을 알 수 있다. 이와 같이 주요 네 개의 공항에서 이착륙하는 국제 항공편에 대하여, 이륙 후 사용하는 첫 번째 항공로와 공항 착륙 전 마지막으로 이용하는 항공로의 매칭 작업을 수행하였다. G597과 A586 항공로의 경우, 인천 공항과 김해공항 좌우를 걸쳐 퍼져있으므로, 공항 기준으로 Right(R)과 Left(L)로 항로를 세분화 시켰다. A582의 경우는 김해공항을 기준으로 Up(U)과 Down(D)으로 세분화하고, A586의 경우는 김해공항을 기준으로 Right(R)과 Left(L)로 항로를 세분화 하여 매칭을 수행하였다.

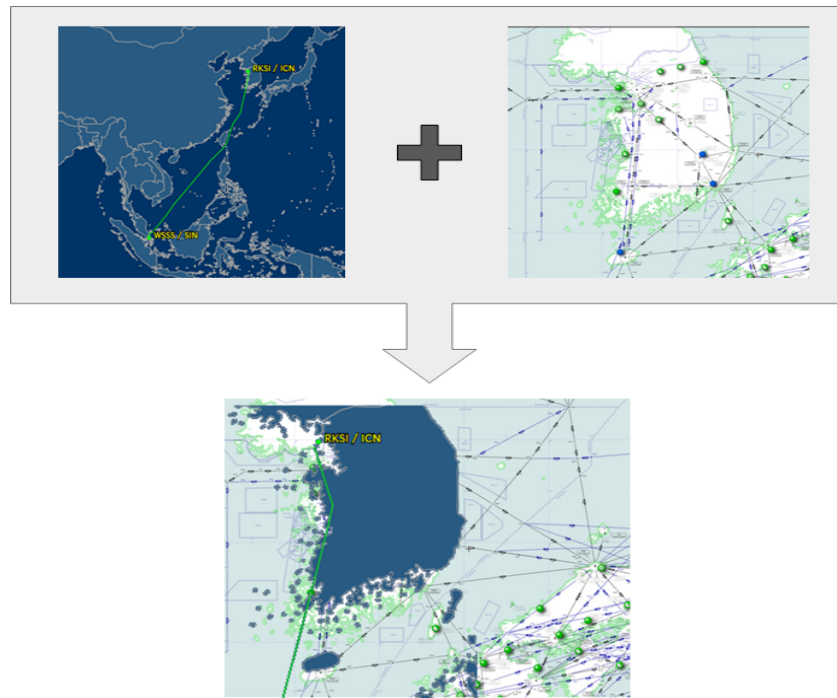


Figure 5. Example of assigning the route (ICN-SIN)

#### 4. 기초분석결과

매칭이 완료된 공항별 데이터를 합산하여 주요공항의 항공교통량을 요일별 운항편수, 공항별 운항비율, 지역별 운항비율 등으로 각각 도출하였다. 일요일이 873편으로 일일 운항편수가 가장 많았으며, 화요일이 782편으로 가장 적게 나타났다. 운항 편수의 공항별 비율을 살펴보면, 인천공항이 76.9%로 전체의 4분의 3 이상을 차지하고 있었으며, 김해공항(12.7%), 김포공항(7%), 제주공항(3.4%) 순으로 나타났다(Table 3). 기종별 승객수와 상관없이 운항 편수만을 고려하여 지역별 분포를 도출하였다. 지역 구분은 국토교통부 “항공통계 작성 매뉴얼” 기준에 따라 지역을 구분하였으며, 수집된 데이터의 1주일 데이터와 해당 월의 통계자료와 비교 분석하였다(Table 4). 국내에서 가장

**Table 3.** Number of flights for routes (ICN, GMP, PUS and CJU) (data : 2013.09.21.-2013.09.27.)

	Route	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun	Total/Ratio
ICN	G597_B467	6	9	6	6	10	8	8	4460 (76.9%)
	G597_R	77	69	79	70	74	78	82	
	G585	71	66	66	66	69	69	72	
	A582_U	41	38	41	38	48	46	48	
	Y711	136	122	136	138	133	151	149	
	Y722	130	133	123	132	141	143	142	
	G597_L	85	84	85	83	87	87	88	
	Y644	82	81	89	82	84	83	90	
	Total	628	602	625	615	646	665	679	
GMP	G597_R	19	19	19	19	19	19	19	406 (7%)
	G585	19	19	19	19	19	19	19	
	Y711	6	6	6	6	6	6	6	
	Y722	6	6	6	6	6	6	6	
	G597_L	4	4	4	4	4	4	4	
	Y644	4	4	4	4	4	4	4	
	Total	58	58	58	58	58	58	58	
PUS	A586_R	12	16	12	14	12	16	12	737 (12.7%)
	A582_D	14	14	12	14	13	15	14	
	A582_U	14	13	16	13	18	14	14	
	A586_L	50	42	48	51	48	44	50	
	G203	16	16	16	16	16	16	16	
	Total	106	101	104	108	107	105	106	
CJU	Y711	14	8	8	13	14	9	11	196 (3.4%)
	Y722	14	8	8	13	14	9	11	
	A595	6	5	7	4	8	4	8	
	Total	34	21	23	30	36	22	30	
Total		826	782	810	811	847	850	873	5799

**Table 4.** Compare the collected data with statistical data from MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

Region	(DATA: 2013.09.21.-27.)		MOLIT(2013.09)	
	number of flights	ratio	number of flights	ratio
Japan	1,386	23.90	6,179	22.08
China	1,704	29.38	8,084	28.89
Northeast Asia	510	8.79	2,496	8.92
Southeast Asia	1,162	20.04	5,147	18.39
America	344	5.93	2,583	9.23
Europe	371	6.40	2,015	7.20
Oceania	220	3.79	930	3.32
Etc*	102	1.76	547	1.95
Total	5,799	100	27,981	100

\*Etc: Southwest Asia, Africa.



많이 운항을 하는 지역은 중국, 일본, 동남아시아 순으로 나타났다. 아시아 전체비율은 82.1%로 나타났으며, 유럽 6.4%, 아메리카 지역 5.93% 나타났다. 본 연구를 위해서 수집된 1주일간의 지역별 데이터와 국토교통부 통계자료와 비교한 결과 아메리카 지역 및 동남아 지역의 비율이 조금은 상이하게 나타났으나, 그 외의 지역별 운항비율이 비슷하게 나타났다.

### 5. 시나리오

Figure 3에서 제시된 화산 폭발 확산 모형을 참고로 하여 백두산 폭발에 따른 남한의 항공교통의 1주일간의 영향을 Figure 6과 같이 도출하였다. 총 4단계로 구성된 항공로 및 공항의 폐쇄 시나리오이다.

첫째 날에는, G597-B476, G597\_R, A586\_R 항로가 영향을 받아 항공로가 폐쇄되고, 아메리카 지역 및 일본의 일부 도시로 출도착하는 항공편이 결항된다. 둘째 날에는, 첫째 날에 영향을 받은 항공로 뿐 아니라, G585, A582, A586\_L, G203의 항로 및 김해공항도 폐쇄 된다. 그러므로 전 일본 도시 및 오세아니아 지역의 항공편이 모두 운항을 할 수 없게 된다. 셋째 날, Y711, Y722 항로 및 제주공항이 추가로 영향을 받으면서 중국과동남아 지역의 운항편이 영향을 받는다. 마지막으로 넷째 날부터 마지막 날까지는, G597\_L와 Y644항로 및 김포공항과 인천공항이 영향을 받으면서 주요 4개의 공항과 연결된 주요항공로가 모두 폐쇄되어 주요공항의 이착륙하는 모든 항공편이 결항 된다.

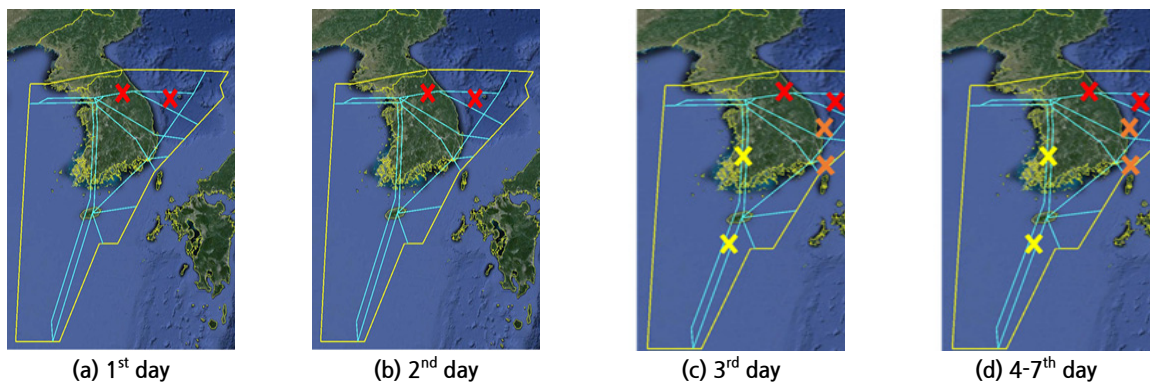


Figure 6. Hypothetical scenario - 4 steps (Google earth)

## 연구 결과

### 1. 항공로 및 공항 피해량

시나리오에 따라 폭발요일에 따른 1주일간의 국내 주요 공항의 국제항공편 피해량을 도출하였다. 가장 피해가 적은 요일은 금요일에 폭발했을 경우였으며, 가장 피해가 큰 요일은 화요일에 폭발했을 경우로 나타났다. 화요일에 백두산이 폭발하여 가상의 시나리오로 항로와 공항이 폐쇄된 경우, 1주일간 5,799편의 계획된 항공편 중 4,481편이 결항되어 평균 결항률이 77.3%에 도달할 것으로 예측되었다.

Table 5. The number of cancelled flights (scheduled flights: 5,799)

Eruption day	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Cancelled flights	4,443	4,481	4,440	4,417	4,374	4,376	4,387
Rate(%)	76.6	77.3	76.6	76.2	75.4	75.5	75.7

시나리오에 따른 일별 항공교통 피해량을 살펴보면, 첫째 날의 결항률은 14%, 둘째 날에는 41.4%, 셋째 날에는 78.7%의로 나타났으며, 넷째 날부터는 모든 항공로와 공항이 닫히게 되어 결항률이 100%가 될 것으로 예측되었다 (Figure 7). 가장 피해가 크게 발생하는 화요일의 시나리오 결과는, 첫째 날(화요일)에는 B597\_R, B597\_B467 및 A586\_R 항로를 이용하는 항공편이 결항되며, 계획된 782편 중에서 113편이 결항되었다. 둘째 날(수요일)에는 A586\_L, G585, A582D/U, A203이 추가로 폐쇄되어 누적 결항 편은 334편으로 늘어나며, 누적평균은 28%로 나타났다. 셋째 날(목요일)에는 Y711&Y722 항로 및 A595 항로가 추가로 폐쇄되어 누적평균결항률은 45.15%로 증가하며, 넷째 날부터 일곱째 날까지는 모든 항공로와 공항이 폐쇄되어 누적평균결항률이 77.3%까지 나타났다(화요일 폭발기준). 따라서 1주일간 1,000편의 항공기가 계획되었을 경우 773편의 항공기가 화산재로 인하여 결항됨을 나타낸다.

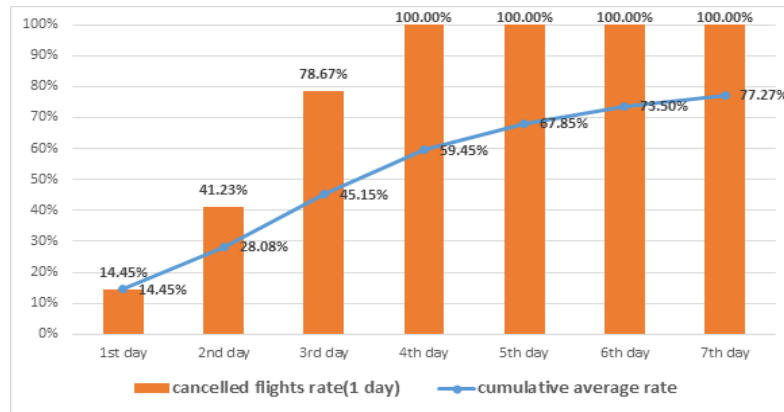


Figure 7. Cancelled flights rate(1 day) and cumulative average rate

Table 6는 시나리오에 따른 항공로와 공항의 일별 피해량을 나타낸다. 결항률이 가장 높은 공항은 김해공항이며, 제주공항이 가장 적은 결항률을 나타냈다.

Table 6. Cancelled flights rate(1 day) and cumulative average rate (major airports)

	ICN	GMP	PUS	CJU
1 <sup>st</sup> day	13.0%	32.8%	13.7%	0.0%
2 <sup>nd</sup> day	30.7%	65.5%	100.0%	0.0%
3 <sup>rd</sup> day	73.2%	86.2%	100.0%	100.0%
4-7 <sup>th</sup> day		100.0%		
Average	73.8%	83.5%	87.7%	71.4%

## 2. 피해 여객수

항공로 및 공항 폐쇄에 따라 항공편이 결항되며, 항공편을 탑승코자 했던 승객이 항공편을 이용하지 못하는 피해가 발생하게 된다. 항공편별 탑승 승객수에 대한 통계정보는 제공되지 않으나, 공항별 한 달간의 지역별 여객수 통계자료를 활용하여 도출 하였다. 제공된 통계자료와 본 연구에서 사용한 지역별 데이터의 비교는 앞서 제시한 Table 4와 같다. 관련 통계량을 활용하여 각 공항별/지역별 항공기 편당 평균 승객수를 도출한 값과 시나리오에 따른 결항된 공항별/지역별 항공편 수를 곱하여 피해 여객량을 예측하였다(Table 7). 1주일 동안 4개의 공항에서 국제선을 이용하는 승객 중 67만 5천여 명의 승객들이 화산재로 인한 항공로 및 공항의 폐쇄로 피해를 입을 것으로 예측 되었다.

Table 7. Estimate of impact of passengers with the scenario

		Statical data from MOLIT			Passenger impact	
		Number of flights	Total number of pax	Number of pax/flight	Cancelled flights	Total impact pax
ICN	Japan	3669	521,637	142.17	724	102,931.08
	China	5802	834,335	143.80	788	113,314.40
	Northeast Asia	1933	348,800	180.44	274	49,440.56
	Southeast Asia	4517	744,621	164.85	755	124,461.75
	America	2530	337,966	133.58	323	43,146.34
	Europe	1947	306,343	157.34	222	34,929.48
	Oceania	930	163,397	175.70	185	32,504.50
	Etc	547	92,000	168.19	67	11,268.73
GMP	Japan	1137	220,754	194.15	247	47,955.05
	China	477	97,143	203.65	72	14,662.80
	Northeast Asia	118	15,905	134.79	20	2,695.80
PUS	Japan	1197	122,874	102.65	258	26,483.70
	China	869	101,444	116.74	170	19,845.80
	Northeast Asia	333	41,799	125.52	69	8,660.88
	Southeast Asia	629	87,978	139.87	129	18,043.23
	America	53	5,472	103.25	12	12,390.00
	Europe	68	4,484	65.94	14	923.16
CJU	Japan	176	20,807	118.22	30	3,546.60
	China	936	144,025	153.87	118	18,156.66
	Northeast Asia	112	13,239	118.21	4	472.84
	Total	27980	3,687,274	2,842.93	4481	674,682.36

## 결론 및 한계점

본 연구는 백두산 폭발에 따른 화산재가 항공교통에 미치는 영향성을 정량적 수치로 도출하였다. 가상의 피해시나리오와 실제 운항데이터를 적용하여 1주일간 주요 4개 공항의 국제항공편 결항률을 일별, 누적평균별로 예측하였다. 실제 운항데이터를 항공로와 매칭하여 항공로별 피해량을 예측하는 정량화 방안을 제안하였다. 기존의 연구에서 수행된 공항 일수 폐쇄에 따른 결항편수 산정이 아닌 실제 상황을 보다 구체적으로 반영하여 예측된 영향성을 일별로 혹은 공항별로 예측하였다. 더불어, 결항된 편수와 기존의 통계 자료를 활용하여 여객 피해량도 도출하였다. 관련 정량화 방안은 시스템 개발을 통하여 항공교통 피해 예측을 보다 정확하고 신속하게 도출할 수 있을 것이다. 예측된 항공교통 피해량은 항공관련 이해당사자들의 향후 항공교통 대응체계 수립을 위한 기초자료로서 활용되며, 항공 산업의 선제적(Proactive)·예측적(Predictive) 대응방안에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점은 농도와 위치정보가 포함된 백두산 폭발의 화산 모형이 부재한 상황에서 가상의 시나리오만으로 영향성을 도출한 것이며, 향후 연구에서는 화산재 농도 정보가 포함된 화산 모형을 적용하여 보다 실제적인 영향성 평가를 할 수 있다고 판단되어진다.

항공사는 계절별 운항노선의 변화가 있으며, 화산재 또한 계절에 따른 바람의 영향을 받고 있다. 그러므로 향후 연구에서는 계절에 따른 화산 모형과 운항스케줄을 고려하여, 계절별 시나리오에 따른 항공교통 영향성을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어, 현재 적용된 운항스케줄은 국내 주요공항의 국제선 항공편에 대해서만 고려하였으나, 국내 항공편 또는 주요공항 외의 공항 및 국내 영공통과항공편<sup>1)</sup> 등을 추가적으로 고려할 수 있을 것이다.

1) 국내 통과비행량은 일평균 129편이다(2016.01 기준, 국토교통통계누리).

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant ‘Development of Advanced Volcanic Disaster Response System considering Potential Volcanic Risk around Korea’ [MPSS-NH-2015-81] from the Natural Hazard Mitigation Research Group, Ministry of Public Safety and Security of Korea.

**알림** : 본 논문은 사단법인 한국화산방재학회 2015년 추계학술대회(2015.11.20) 및 1st International Conference on Volcanic Hazard Mitigation(2016.04.01) 에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

## REFERENCES

- Boeing (2011), Safe, Efficient flight Operations in Regions of Volcanic Activity, Aero magazine, QTR\_03
- EUROCONTROL (2010), Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic, STATFOR, the EUROCONTROL Statistics and Forecast Service, v1.0.
- Guffanti M., Casadevall T., Mayberry G. (2003), Encounters of Aircraft With Volcanic-ahs Clouds: An Overview, U.S. Geological Survey, 8-8.
- Hong S. J., Baik H. J. (2010), Global Trend and Prospect of Aviation Policy, Monthly KOTI Magazine on Transport, 153, 14-20.
- Hufford G. L., Salinas L. J., Simpson J. J., Barske E. G., Pieri D. C. (2000), Operational implications of airborne volcanic ash, Bulletin of the American Meteorological Society, 81(4), 745-755.
- International Air Transport Association (2010), Press Release, 15.
- International Civil Aviation Organization (2012), ICAO Doc 9974 Flight Safety and Volcanic Ash.
- Jang E. S., Cha E. Y., Koo K. M. (2013), Analysis of the Characteristic of Foreign Models for Interpretation of Diffusion of Volcanic Ashes, Korean Society for Atmospheric Environment, 196-196.
- Jiang Z. H., Yu S. Y., Yoon S. M., Choi K. H. (2013), Damage and Socio-Economic Impact of Volcanic Ash, Jour. Korean Earth Science Society, 34(6), 536-549.
- Kim H. W., Park J. E. (2013), An Analysis of Disaster Management Response With respect to Super volcano Disaster Case Studies, Journal of KOSHAM, 13(2), 151-156.
- Kim K. Y., Park K. O., Hwang J. M., Kim T. H. (2013), Developing Surface and Aviation Transportation Disaster Management.
- Kim S. D., Lee Y. J., Yoon S. M. (2014), Estimation of Economic Impact on the Air Transport Industry based on the Volcanic Ash Dispersion Scenario of Mt.Baekdu, Journal of International Area Studies, 18(3), 109-143.
- Lee S. H., Jang E. S. (2012), A Case Analysis of Volcanic Ash Dispersion under Various Volcanic Explosivity Index of the Mt.Baegdu, Jour. Korean Earth Science Society, 33(3), 280-293.
- Lee Y. J., Lee Y. J., Kim S. D., Chun J. S., Yoon S. M. (2014), Simulation of Economic Losses Based on the Eruption Scenario of Baekdusan Volcano, Journal of International Area Studies, 18(3), 79-108.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (2010), Press Release(Aviation).
- Park J. H. (2013), Effective Volcanic ash Response Plans for Aviation Safety, Journal of Aviation Development of Korea, 60, 53-72.
- Prata A.J., Tupper A. (2009), Aviation Hazards From Volcanoes: The State of the Science Natural Hazards 51, 239-244.
- Scaini C., Folch A., Bolic T., Castelli L. (2014), A GIS-based Tool to Support Air Traffic Management During Explosive Volcanic Eruptions, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 49, 19-31.
- Standards for the Response of Volcanic Eruption Disasters, 2013 spring congress Korean Planning Association.