

## 제주도 송악산 단성화산의 암석학적 진화

황상구 · 원종관<sup>1</sup> · 이문원<sup>2</sup> · 윤성효<sup>3</sup> · 이인우<sup>4</sup> · 김성규

안동대학교 지구환경과학과, <sup>1</sup>강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>강원대학교 지구과학교육과  
<sup>3</sup>부산대학교 지구과학교육과, <sup>4</sup>대한광업진흥공사

## Petrologic Evolution of the Songaksan Monogenetic Volcano, Jeju Island, Korea

Sang Koo Hwang, Chong Kwan Won<sup>1</sup>, Moon Won Lee<sup>2</sup>, Sung Hyo Yun<sup>3</sup>  
In Woo Lee<sup>4</sup> and Seong Kyu Kim

Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Geoscience Education, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Geoscience Education, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

<sup>4</sup>Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea

**요약:** 이 연구는 송악산 화산의 층서에 따라 시료를 채취하여 암석기재, 암석화학적 변화를 추적하여 이 화산의 암석학적 진화를 밝히는 것이다. 송악산 화산은 응회환, 분석구, 용암연, 소분석구로 구성되는 작은 단성복식화산이다. 조성변화는 응회환의 안산암 성분에서 분석구와 용암연의 조면현무암 성분에 이른다. 응회환에서의 안산암은 분출시에 폭발지점에서 석영 등의 외래물질 혼입으로 다소 이탈된 것이며 이를 고려하면 원래 마그마 조성이 조면현무암에 가까운 조면안산암이다. 따라서 조성변화는 조면안산암에서 조면현무암까지 변화하며, 제주도 화산암류에서 널리 인식되는 가장 진화된 조성과 더 원시적인 조성 사이의 연속선에 놓인다. 그러나 전체적으로 이들은 분출전에 조성이 조면안산암에서 조면현무암으로 누대된 마그마저장소에서 유래된 것으로 생각되며, 이 조성누대는 알칼리 마그마에서 분별결정작용에 의해 조래된 것이다. 결론적으로 송악산 화산은 조성누대된 마그마저장소의 상단으로부터 출조되고 다음에 계속적으로 아래의 더 원시적인 마그마를 분출하였다.

**핵심어:** 송악산 화산, 조성변화, 알칼리 마그마, 조성누대, 분별결정작용

**Abstract:** Songaksan volcano, which occurs as a monogenetic volcano on the southwestern promontory of Hallasan shield volcano, is composed of tuff ring, cinder cone, lava pond and cinder conelet complex on wide basalt plateau. Except for an influx of external quartz xenocrysts in the tuff ring. Totally the volcano ranges from trachyandesite to trachybasalt in petrography and chemical compositions, which confirm the continuum between the evolved and primitive compositions widely occurring in the Jeju volcanic system. Chemical data for the volcano show quantitative compositional variation from the lower to the upper part of the volcanic sequences. The continuous compositional variations generally define a compositionally zoned magma storage. The chemical data suggest that the compositional zonations might have resulted from the fractional crystallization of a parental alkali magma. As result, the Songaksan volcano initially tapped the top of the zoned magma storage and subsequently erupted successively more primitive magma.

**Key words:** Songaksan volcano, Compositional variation, Alkaline magma, Compositional zoning, Fractional crystallization

### 서 언

제주도는 최근 약 100만년 이내에 일어난 알칼리

계열의 화산활동에 의해 형성되었으며, 이 알칼리 계열 암석들은 화학적 기준에 의하면 현무암에서 조면현무암, 조면안산암과 조면암 등의 진화암군으로 구분될

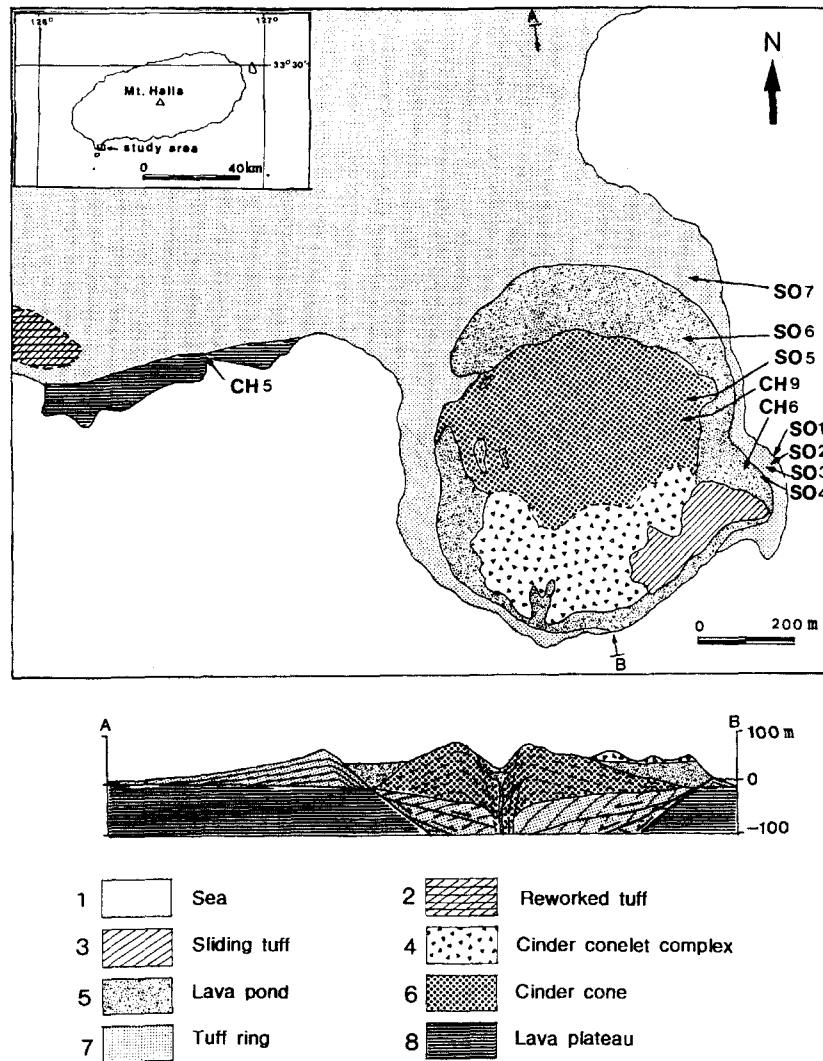


Fig. 1. Location and geological map in the Songaksan volcano.

수 있다. 송악산 화산은 남서단 해안에 위치하는 소형 화산이지만(Fig. 1), 거의 최후기에 여러 분출양식에 의해 형성된 특징들을 보여준다. 이 화산은 알려진 바와 같이 화도의 환경변화에 의하여 3가지의 분출양식에 의하여 형성되어 외곽에 응회환(tuff ring)이, 이의 분화구 내에 분석구(cinder cone), 이 양자 사이에 용암연(lava pond)과 그 위에 소규모 지표쇄설층(epiclastic deposits)으로 구성되어 있다(황상구 외, 1992). 이들은 복잡하지만 1유회의 분출과정에 의해 형성된 단성화산이다(황상구, 2000).

제주도는 여러 암석학자들에 의해 전체적으로 혹은

지역적으로 마그마의 성인과 진화에 대하여 논의해 왔지만(원종관, 1976; Lee, 1982; Nakamura *et al.*, 1989, 1990; 박준범과 권성택, 1993; 이문원 외, 1994), 아직도 하나의 단성화산을 대상으로 한 마그마진화의 연구는 수행된 바 없다. 마그마진화는 단성화산에서 인식되기가 어렵지만 적어도 모체와의 파생관계라도 알아낼 필요성이 있다고 본다. 그래서 필자들은 송악산 화산을 대상으로 암석기재와 조성변화에 의하여 암석학적 진화를 논의해 보고자 한다. 여기서 우리는 층서에 따라 시료를 채취하여 암석기재와 화학분석을 실시하였으며, 이 송악산 화산에서의 암석학적 진화에 대

한 중요한 발견을 간단히 토의한다.

### 지질개요

제주도는 플라이오세 후기 이후부터 한라산을 중심으로 형성된 화산섬이며 전체적으로 순상화산을 이룬다. 이 섬은 대부분 현무암질 용암과 소량의 화성쇄설암과 지표쇄설층으로 구성되며 이들은 대부분 화학적으로 알칼리현무암에서 하와이아이트, 뮤저라이트, 벤모레아이트와 조면암에 이르는 Na-계열의 알칼리 화산암으로 구성된다(원종관, 1976; Lee, 1982; 박준범과 권성택, 1993; 이문원 외, 1994; 원종관 외, 1998). 이 섬은 약 360여 개의 기생화산을 가지며, 이들은 대부분 분석구들이고 나머지 약 10여 개가 옹회구와 옹회환이고 이 중앙에 대부분 분석구를 가진다. 전자는 대체로 해안에서 먼 육상에 분포하고 반면에 후자는 해안선에 인접하여 해수와 밀접한 관계가 있음을 시사한다(Kim *et al.*, 1986). 이들 옹회구와 옹회환은 제주도 서부에서 현무암대를 기준으로 선후기 2개 군으로 나누어지며 대부분 옹회구가 선기 화산군에 속하고 나머지 송악산과 수월봉 옹회환이 후기 화산군에 속한다(김동학 외, 1989; Hwang *et al.*, 1991).

송악산 화산의 기반암은 제주도 서부에 넓게 분포하는 광해악현무암(박기화 외, 2000)의 용암대지이다. 이 현무암은 사면경사가 매우 평탄하며 본역 북쪽에서 약 1 m 두께의 고산층과 송악산옹회암에 의해 덮힌다. 고산층은 당산봉 근처에서 애추층과 이질층으로 구성되고 송악산옹회암은 본역 북쪽에서 수월봉 옹회환을 형성한다. 또한 이 송악산옹회암은 본역에서 송악산 화산의 최하부인 송악산 옹회환을 형성한다.

송악산 화산은 알려진 바와 같이 화도의 환경변화에 따라 여러 화산단위로 구성된다(김동학 외, 1989). 외곽에 옹회환이 형성되어 있고 이의 분화구 내에 분석구가 형성되어 있으며, 이 양자 사이에 용암연으로 구성되고 그 위에 소규모의 소분석구 복합체(cinder cone-complex)가 조합되어 있다. 그리고 이들 상위에는 부정합으로 지표쇄설층이 덮고 있다(Fig. 1).

옹회환은 제주도 남서부에 평탄한 현무암 대지 위에 놓인다. 이 옹회환은 최고두께가 85 m이고 최고경사가 23°이며, 외륜에서 말단부까지의 길이가 1.6 km이고 경사가 분화구로부터 멀어질수록 점차 완만해진다. 분석구는 옹회환의 분화구 내에 등지모양으로 자리잡고 있는 작은 원추형 화산체이다. 이 분석구는 최고높이가 해발 104 m이며 최대 사면경사는 30° 내외로서 급한 경사를 이루며, 중앙에는 사발모양의 깊은 분화구가 형

성되어 있다. 용암연은 옹회환과 분석구 사이의 모우트에 환상으로 존재한다. 이 용암연은 옹회환과 주 분석구를 피복하며, 이의 표면에는 소분석구 복합체로 덮히거나 용암기종(lava blister)이 형성되어 있으며, 남동부에서 지표쇄설층에 의해 덮힌다.

지표쇄설층은 슬라이딩 옹회암(sliding tuff)과 재이동 옹회암(reworked tuff)이 있다. 슬라이딩 옹회암은 소분석구 복합체의 남쪽에 국부적으로 분포되며, 남측 해안절벽에서 용암연 위에 최고 4 m 두께로 거의 수평으로 존재한다. 재이동옹회암은 본역 서부의 옹회환 말단부 해안 근처에서 서쪽으로 연장되는 하모리층(박기화 외, 2000)이며, 만조시에도 현재의 해수면보다 1~2 m 위에 존재한다. 이들은 아직 굳지 않은 옹회환의 테프라가 그 사면을 따라 재이동되어 퇴적된 것이다.

### 구성원과 암석기재

#### 옹회환

옹회환에서는 암상을 세밀하게 구분하여 기재한 바 있다(Chough and Sohn, 1990). 이들은 화산회와 라필리와 소량의 불록으로 구성되고 이들은 각층마다 구성 비율이 다양한 옹회암과 라필리옹회암을 형성한다.

화산회는 입도가 2 mm 이하 크기로서 대부분 유리편, 결정편과 암편으로 구성된다. 유리편은 작은 기공을 가지고 대부분 깨진면과 기공벽에 의해 둘러싸임으로써 오목하고 불룩한 면을 갖는 불룩상 모양(blocky shape)을 이룬다. 이러한 입자의 모양은 마그마가 외부물과 상호작용으로 수증기마그마성 폭발(phreatomagmatic explosion)이 일어날 때 발생하는 파편화작용에 의해 형성된 것을 지시한다(Wohletz, 1983). 이들은 분석구의 스크리아와 같이 흔히 작은 사장석 래스를 가지고 가끔 감람석과 휘석을 가지며, 유리질 부분이 대부분 수화작용에 의해 담갈색의 황갈유리(palagonite)로 변질된 것이고 얼마가 티탄자철석 미정으로 인해서 불투명한 현무유리(tachylite)인 것도 있다(Fig. 2A). 결정립은 대부분 석영이고 가끔 정장석, 미사장석, 사장석, 감람석과 휘석이 소량 포함된다. 석영은 파편상이고 이 중에 큰 것이 파동소광을 나타내는데 이들은 정장석, 미사장석과 함께 기반물질에서 유래된 외래결정편인 것으로 생각된다. 사장석, 감람석과 휘석들은 대부분 분석구와 용암연에서의 조면현무암의 특징과 유사하다. 암편은 드물게 석영립이 풍부한 사암편과, 파동소광하는 석영들이 불합상으로 접하는 규암편이 외래암편으로 포함되어 있다(Fig. 2B). 기질은 투명한 담갈색 유리가 풍부하지만, 티탄자철석 미정으로 인해서 불투명한 부

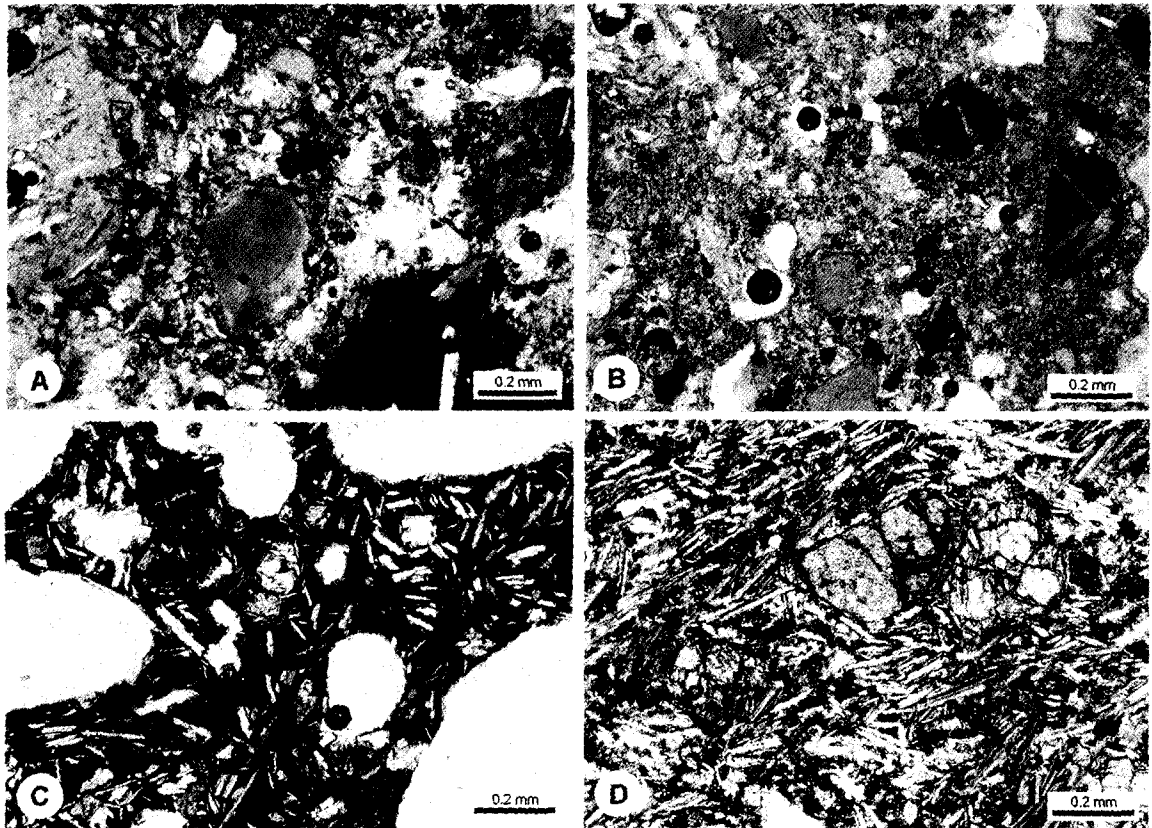


Fig. 2. Photomicrographs of thin sections under open nicol with 0.2 mm long scale bars. A, Tuff consisting of light brown palagonitic glass, quartz sand grains and tachylitic glass; B, Tuff consisting of light brown palagonitic glass, quartz sand grains, tachylitic glass and grid-patterned microcline in a matrix of palagonized fine vitric ash; C, Moderately vesicular scoria with hyalopilitic to pilotaxitic fabric of plagioclase laths and intergranular olivines in a tachylitic glass; D, Basalt consisting of clinopyroxene and olivine microphenocrysts, and pilotaxitic plagioclase laths in a glassy mesostasis.

분도 있다. 한편 외래결정과 외래암편은 제주도 순상 화산 아래의 기반물질에서 유래된 것으로 생각된다. 이러한 해석의 근거는 제주도 서부지역에서 해수면 아래 약 -85 m부터 사질과 이질의 미고결 퇴적층이 200 m 이상 두껍게 화산암류의 기반물질로 존재하는 사실을 들 수 있다(박준범, 1994). 또한 제주도 화산암류의 기반암으로 백악기 화강암류, 응회암류와 변성암류로 구성되어 있다는 것을 들 수 있다(原口九萬, 1931; Kim *et al.*, 1986; 안건상 외, 1995).

라필리는 다공상 현무암과 괴상 현무암이 대부분이다. 다공상 라필리는 암회색, 암갈색의 유리질 석기에 드물게 사장석, 티탄철석, 감람석과 휘석을 갖는다. 이들은 그 기공도(vesicularity)가 10~50% 범위이고 많은 기공으로 인해 그 모양이 아주 불규칙하며, 유상면을 보인다. 이들은 마그마가 스템폭발되기 전에 이미 가

스에 의한 기공이 형성되었음을 의미하고 완전히 굳기 전에 유체상태 하에서 과편화가 진행되었음을 의미하기 때문에 동일 마그마원일 것으로 해석된다. 괴상 라필리는 회색이 우세하고 이의 모서리가 다소 둥근 편이며, 아마도 송악산 응회환 하위의 현무암에서 유래된 유질암편(accessory lithics)인 것으로 생각된다. 그러므로 마그마에서 직접 유래된 화산회의 유리편과 라필리에 의하면 이 응회암은 아마도 사장석, 티탄자철석, 휘석, 감람석 광물군으로 조성된 조면현무암에 가까운 조면안산암에 속할 것 같다.

#### 분석구

분석구는 암갈색의 라필리, 화산탄, 스패터(spatter) 등의 스킨리아와 블록으로 구성되며 대부분 산화도 증가에 따라 적갈색을 나타낸다. 이들은 미약한 층리를

보여주며, 스페터들은 서로 약간 유착되어 있다. 보다 큰 블록과 화산탄은 분석구의 표면과 기저를 무질서하게 둘러싼다.

라필리는 등경상으로 다소 둥근 편이고 그 크기가 대부분 1~2 cm 내외이지만 6 cm 범위까지이다. 이들은 대부분 회색을 띠고 간혹 암갈색을 띠기도 하며 기공이 35~50% 정도를 차지할 정도로 심다공질(highly vesicular)이다. 이러한 라필리는 분석구의 내부 즉 상부일수록 풍부하다.

화산탄들은 평균 10~20 cm 내외가 가장 많고 수 m 되는 것도 있다. 이들은 그 내부가 암회색으로서 다공상이고 그 외곽이 적갈색으로서 빵껍질 모양을 이루고 방추형, 계란형, 양배추형을 이룬다. 화산탄은 분석구의 내부에서 드물게 포함되어 있으나 외부 즉 상부일수록 풍부해진다. 암갈색은 산화도 증가를 나타내며 이는 공기와 반응이 쉬운 간헐적인 포출을 일으켰음을 지시한다.

스페터들은 대개 15~20 cm 크기이며 암질이 화산탄과 대동소이하다. 스페터는 표피부분이 적갈색이나 내부로 갈수록 암갈색과 암회색을 띠며 매우 불규칙한 유동상을 보인다. 특히 이들은 그 외형이 상당히 다양한 리본형, 소뿔형 등을 나타내며 주위의 여러 입자들에 의해 눌리고 구부러져 있고 서로 유착되어 달라붙어 있다. 스페터는 분석구의 상부에서만 발견되고 표층부로 갈수록 더 풍부해진다.

라필리, 화산탄과 스페터 등의 스킨리아는 외형이 대부분 깨진면과 기공벽에 의해 둘러싸임으로써 오목하고 볼록한 면을 갖는다. 기공들은 직경 최고 1 cm 크기로서 스폰지 모양으로 형성되어 있고, 이들은 원형 내지 불규칙 모양이며 후기 단계에 형성되었음이 틀림

없다. 왜냐하면 석기의 사장석들이 그들 속으로 불규칙하게 튀어나와 있고 가끔 그 기공벽을 따라 나란히 배열되어 있기 때문이다. 이 스킨리아들은 대부분 유리질이고, 사장석, 감람석과 휘석 등이 미반정 혹은 석기로 성장되어 있다. 사장석은 모두 라쓰상 사장석들에 의해 양모배열상(pilotaxitic) 내지 유리양모상(hyalopilitic) 석리를 나타낸다. 또한 유리질 부분은 흔히 티탄자철석 미정으로 인해서 불투명한 현무유리를 형성한다(Fig. 2C). 그러므로 이 스킨리아들은 휘석, 감람석, 사장석, 티탄자철석 광물군으로 조성된 조면현무암이다.

**용암연**

용암연은 수매의 용암류로 구성되며, 각 용암류는 대체로 괴상이지만 상단부가 1 cm 내외 크기의 기공에 의한 다공상 조직을 나타내고 드물게 수 cm 크기의 초엽기성 포획체를 포함하고 있다(임성아 외, 2000).

각 용암류는 그 표층대가 매우 다공질로서 최고 20~30%의 기공도를 나타내며 종종 2 cm 크기로 신장된 타원체상의 기공을 이룬다. 이 기공의 장축이 놓이는 방향은 거의 용암 표면에 평행한 것이 많다. 용암의 중간대는 기공이 작고 드물다. 하층대는 기공이 표층부보다 훨씬 적으며 간혹 파이프상 기공이 상하방향으로 형성되어 있다.

이 용암은 휘석, 감람석과 사장석 등의 미반정을 소량 함유하는 조면현무암이다. 석기는 사장석, 감람석, 휘석을 함유한다. 사장석은 반자형 라쓰모양이고 장경 0.3 mm 이하이며 흔히 양모배열상 석리를 나타낸다(Fig. 2D). 감람석은 사장석 사이에 간립상(intergranular) 혹은 간전상(intersertal)으로 존재한다. 휘석은 담홍갈색

**Table 1. Major and trace element composition of the Songaksan volcano in Cheju Island.**

	basalt plateau		tuff ring		cinder cone			lava pond		
	CH5	SO1	SO2	SO3	SO7	CH9	SO5	SO4	CH6	SO6
SiO <sub>2</sub>	47.04	55.92	62.70	66.80	61.07	50.87	50.28	50.15	48.29	50.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67	13.58	12.96	11.27	13.30	15.41	15.60	15.13	15.58	15.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	13.60	9.22	8.44	7.17	8.73	12.21	11.97	12.11	13.16	12.20
MgO	9.15	5.57	3.67	3.18	3.71	5.80	6.19	6.83	6.60	6.16
CaO	9.37	4.83	3.64	3.93	4.45	7.48	7.15	7.56	7.91	7.43
Na <sub>2</sub> O	3.05	2.69	2.42	2.76	2.54	3.36	3.68	3.59	3.95	3.78
K <sub>2</sub> O	0.45	2.06	2.14	1.74	1.92	1.80	1.89	1.75	1.79	1.91
TiO <sub>2</sub>	2.16	1.54	1.43	1.27	1.60	2.21	2.18	2.09	2.27	2.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.37	0.30	0.30	0.35	0.58	0.48	0.44	0.54	0.48
MnO	0.16	0.12	0.11	0.08	0.10	0.15	0.14	0.14	0.18	0.14
total	99.96	95.90	97.81	98.50	97.77	99.87	99.56	99.79	100.27	100.86

Table 2. Trace and rare earth element concentration(ppm) of the Songaksan volcano in Cheju Island.

	SO1	SO2	SO3	SO7	SO5	SO4	SO6
Ba	451	518	522	490	471	435	489
Co	24	21	20	22	31	33	31
Cr	94	85	68	79	153	183	147
Cu	31	30	29	32	41	42	34
Li	26	22	16	15	13	12	14
Nb	33	30	27	36	46	40	45
Ni	71	63	54	62	113	129	109
Sc	11	11	9	11	16	17	16
Sr	487	379	362	451	567	547	575
V	105	100	88	96	147	155	151
Y	24	24	20	24	29	27	29
Zn	101	89	80	93	121	115	119
Zr	175	174	188	170	148	124	154
Rb	51	59	48	52	40	35	42
La	36.29	33.72	28.99	35.56	38.26	33.51	37.53
Ce	69.88	64.71	55.99	67.92	73.97	65.09	72.25
Pr	8.43	7.84	6.74	8.18	9.09	8.40	8.70
Nd	30.20	28.30	24.10	28.50	33.10	30.50	32.10
Sm	6.09	5.72	4.89	5.70	6.94	6.37	6.86
Eu	1.86	1.75	1.52	1.83	2.37	2.22	2.35
Gd	5.73	5.37	4.59	5.46	6.79	6.37	6.68
Dy	4.19	3.92	3.25	3.76	4.76	4.49	4.69
Ho	0.85	0.79	0.65	0.75	0.94	0.89	0.92
Er	2.10	1.96	1.61	1.75	2.21	2.03	2.17
Yb	1.75	1.66	1.32	1.45	1.71	1.61	1.69
Lu	0.26	0.25	0.19	0.21	0.24	0.23	0.24
(La/Lu) <sub>n</sub>	14.47	14.00	15.70	17.39	16.32	14.94	16.01
(Eu/Eu*) <sub>n</sub>	0.95	0.95	0.97	0.99	1.05	1.05	1.05

\*Mean value between Smn and Gdn

이고 약한 다색성을 나타내며 역시 간립상으로 존재한다. 간혹 이들은 가끔 깃털상 급냉성장(feathery quench-growth) 형태를 나타낸다. 자형 티탄자철석은 0.01 mm 내외이고 간립상으로 존재하며, 작은 인회석이 아주 드물게 산출된다. 그러므로 이 용암은 휘석, 감람석, 사장석 광물군으로 조성된 조면현무암이다.

### 암석화학

송악산은 복식화산으로서 복잡한 구조를 나타내지만 일윤회의 단성화산이다. 따라서 일윤회 동안에 암석학적 진화를 살펴보기 위해서 이 화산의 층서에 따라 체계적으로 10개 시료를 채취하여 화학분석을 실시하였다. Table 1, 2에서 분석치는 형성순서에 따라 나열했다.

### 화학적 성질

분석치 중 가장 염기성인 것은 현무암대지의 시료로서 SiO<sub>2</sub> 47.04 wt%와 MgO 9.15 wt% 조성을 가지며, 반면에 가장 진화된 것은 SiO<sub>2</sub> 66.80 wt%와 MgO 3.18 wt% 조성을 갖는 응회환의 시료(SO<sub>3</sub>)이다(Table 1). 암석조성분류를 위해 분석치를 Le Bas *et al.*(1986)의 TAS도에 투시해보면 현무암대지의 시료가 현무암 영역, 분석구와 용암연의 시료가 조면현무암 영역, 응회환의 시료가 안산암에서 대사이트 영역에 떨어진다(Fig. 3).

현무암대지, 분석구와 용암연의 분석치는 알칼리 계열로 분류되지만, 반면에 응회환의 것은 특징적으로 비알칼리 계열에 속한다(Fig. 4). 일반적으로 알칼리 계열의 암석은 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O의 비에 따라 Na-계열과 K-계

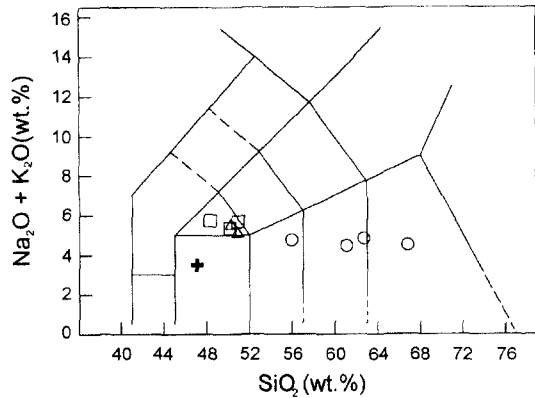


Fig. 3. Total alkalis versus silica diagram of the rocks from the Songaksan volcano (after Le Bas *et al.*, 1986). Symbols are: +, basalt plateau; O, tuff ring; Δ, cinder cone; □, lava pond.

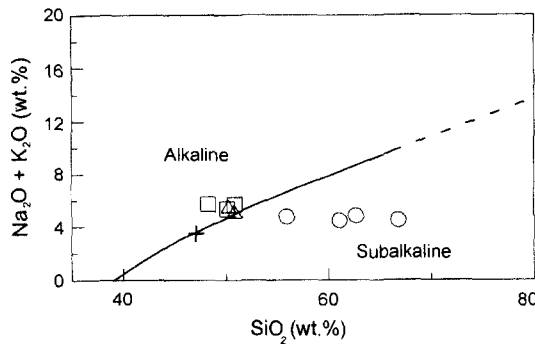


Fig. 4. Alkalis versus silica plot of the rocks from the Songaksan volcano (after Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as in Fig. 2.

열로 구분된다. 제주도의 알칼리암들은 전반적으로 Na-계열의 특징을 가지지만 예외가 있으며, Na-계열의 고프 트렌드(Gough trend)와 K-계열의 하와이 트렌드의 중간 영역에 투시되는 경향이 있는 것으로 알려져 있다(Lee, 1982). 송악산에서 현무암대지, 분석구와 용암연은 마찬가지로  $K_2O/Na_2O$ 의 비가 1/2보다 약간 작은 두 계열의 중간 영역, 즉 Le Bas *et al.*(1989)의 Na-계열과 K-계열의 경계부인 점선의 오른쪽으로 약간 치우치는 Na-계열 투시되는 특징을 보이고 응회환은 이들로부터 이탈하여 1/2보다 훨씬 큰 K-계열 영역에 투시되는 특징을 나타낸다(Fig. 5). 그러므로 분석구와 용암연의 암석은 조면현무암 중에 Na-계열의 하와이아이트에 속하겠으나 명확하지 않고 다소 모호하다. 응회환은 폭발시에 폭발지역에서 기반물질로부터 다량의 석영, 소량의 정장석, 미사장석, 사암, 규암 등이 혼입

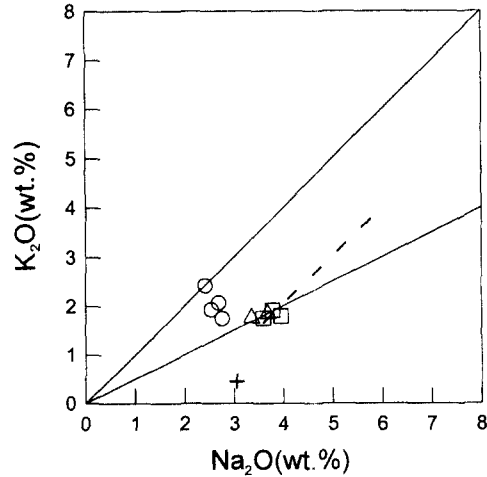


Fig. 5.  $K_2O$  versus  $Na_2O$  plot of the rocks from the Songaksan volcano. Dash line is dividing boundary between sodic and potassic series of Le Bas *et al.*(1986). Symbols are the same as in Fig. 2.

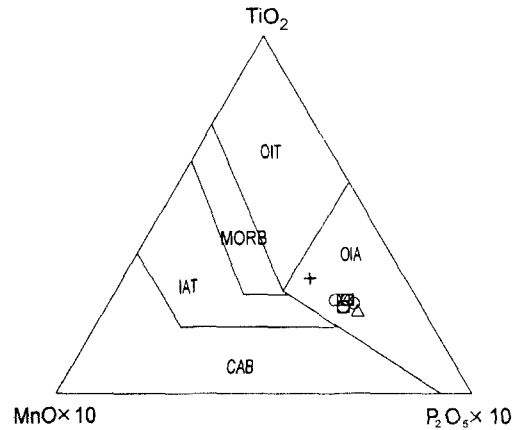


Fig. 6. Tectonomagmatic discrimination diagram of the rocks from the Songaksan volcano (after Mullen, 1983). Compositional fields are: OIT, oceanic island tholeiite; OIA, oceanic island alkalic; MORB, midocean ridge basalt; IAT, island-arc tholeiite; CAB, island arc calc-alkaline basalt. Symbols are the same as in Fig. 2.

됨으로서 원래의 알칼리 마그마 계열에서 벗어나 칼크 알칼리 계열의 안산암 혹은 대사이트의 조성을 갖게된 것으로 생각된다.

송악산 화산에서 산출되는 화산암들은 조구조적 위치가 친액원소, 즉 불호정성원소로 구성된 그림에 도시해서 알아볼 수 있다.  $TiO_2-10MnO-10P_2O_5$  삼각도(Mullen, 1983)에 도시한 결과 화산암들은 대양도 알칼리암으로 분류된다(Fig. 6). 또한 조구조적 위치를 더

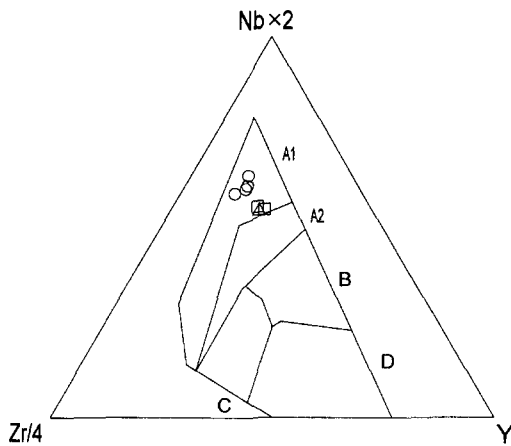


Fig. 7. Tectonomagmatic discrimination diagram of the rocks from the Songaksan volcano (after Meschede, 1986). Compositional fields are: A1, within-plate alkalic; A2, within-plate tholeiite (WPT); B, enriched MORB (E-type MORB); C, volcanic-arc basalt (VAB) and WPT; D, normal MORB (N-type MORB) and VAB. Symbols are the same as in Fig. 2.

명확하게 하기 위하여 미량원소에 의한  $2\text{Nb-Zr/4-Y}$  삼각도(Meschede, 1986)에 도시한 결과 화산암들은 판내 알칼리암의 특징을 갖는 것으로 나타난다(Fig. 7).

#### 화학적 변화

송악산 화산의 층서에 따른 대표적 시료에 대한 주원소, 미량원소와 희토류원소의 분석치는 Table 1, 2에 주어져 있다. 이 화산의 형성순서에 따라 화학적 변화를 살펴보면 다음과 같다. 분별결정작용에 의한 암석의 화학조성 변화를 살펴보기 위해  $\text{SiO}_2$  함량에 대한 다른 주원소 함량의 변화를 도시하였다(Fig. 8).  $\text{SiO}_2$ 의 조성은 47.0~66.8 wt%이며 현무암에서 안산암을 거쳐 대사이트 조성에 이른다.  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ 와  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 조성이 대체로 응회환으로부터 분석구와 용암연으로 점차 연속적으로 증가하는 선형 배열을 보인다(Fig. 8). 반면에  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{K}_2\text{O}$ 는  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소함에 따라 동시에 감소하는 것이 일반적이다. 그러나 여기서  $\text{Na}_2\text{O}$ 는  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때 감소하지 않고, 응회환에서 2.42-2.76 wt%로서 거의 일정하고 분석구와 용암연에서 3.36-3.95 wt%로 거의 일정하여 양자간의 함량차이를 나타낸다.  $\text{K}_2\text{O}$ 는  $\text{SiO}_2$ 의 조성이 감소할 때 약간의 감소를 보이지만 불규칙하게 다소 산재되는 양상을 나타낸다. 이는 아마도 응회환이 형성

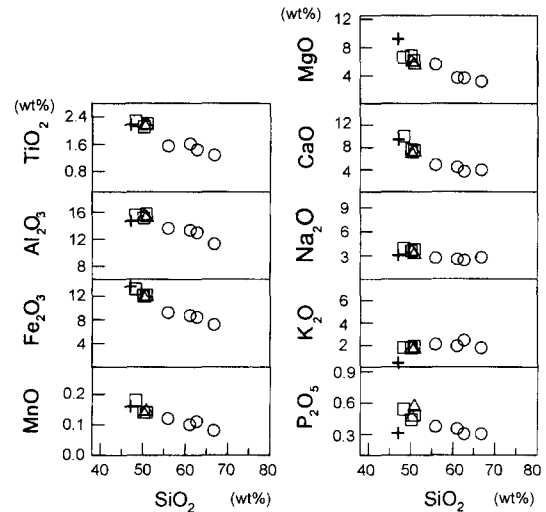


Fig. 8. Harker variation diagram of major elements versus silica of the rocks from the Songaksan volcano. Symbols are the same as in Fig. 2.

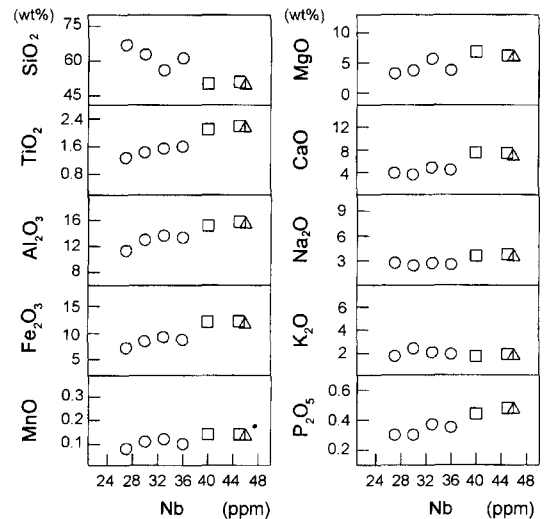


Fig. 9. Harker variation diagram of major elements versus Nb of the rocks from the Songaksan volcano. Symbols are the same as in Fig. 2.

될 때 알칼리가 적고 실리카가 많은 물질(석영, 사암, 규암 등)의 유입이 있었음을 의미한다. 그리고 현무암 대지와 용암연 간에는  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 와  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 조성이 급변한다. 이는 공급지가 서로 다르기 때문에 나타나는 것으로 보인다.

$\text{Nb}$ -주원소 하커도에서  $\text{Nb}$  조성이 증가할 때  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ 와  $\text{P}_2\text{O}_5$  등의 조성도



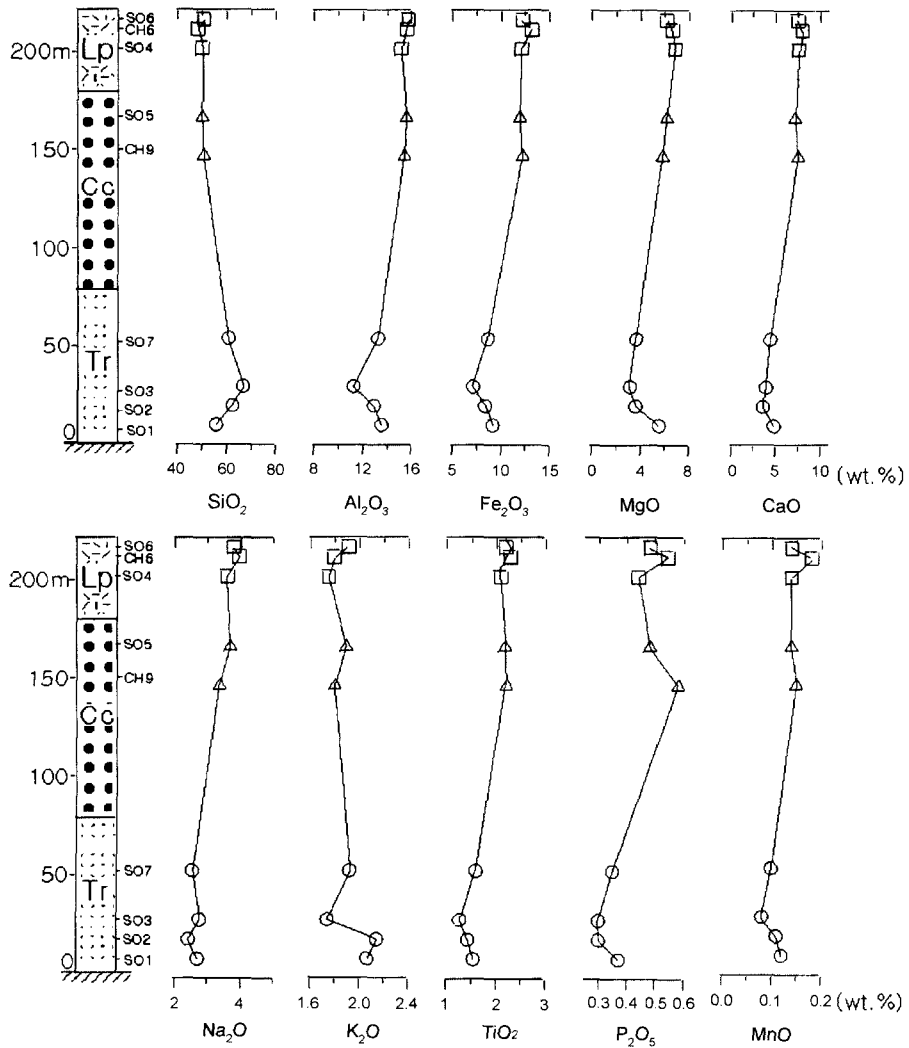


Fig. 10. Variations of major elements across the vertical sequences of the Songaksan volcano. Lp stands for Lava pond; Cc, Cinder cone; Tr, Tuff ring. Symbols are the same as in Fig. 2.

응회환으로부터 분석구와 용암연으로 동시에 연속적으로 증가한다(Fig. 9). 그러나 Nb가 증가할 때 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O는 별로 변화를 보이지 않는다. 이는 아마도 응회환 분출시에 외부로부터 알칼리가 적은 물질이 상당히 유입되었음을 시사한다.

이 두 하커 변화도는 응회환의 외래 물질의 유입을 제외하면 송악산 화산 내에서 뚜렷한 선형 진화 경향을 보여줄 것으로 추정된다. 어느 부분에서도 큰 격차를 가지는 단절된 양상을 보여주지 않는다. 이 화산 내의 변화 경향에서 불연속적인 단절이 나타나지 않고 연속적인 것은 세 암상 모두가 현위치에 분출되기 전

에 동일 마그마의 분화로부터 유래되는 양상임을 지시한다.

그러면 이 화학자료의 층서에 따른 변화를 살펴보면 완만한 파상곡선을 나타낸다(Fig. 10, 11). 주원소의 변화에서 SiO<sub>2</sub>는 대체로 응회환 하부에서 증가하다가 중부에서부터 분석구와 용암연으로 계속 약간씩 감소하는 파상곡선을 보여주고, 반면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 MnO 등은 대체로 응회환 하부에서 중부까지 감소하다가 반대로 분석구와 용암연으로 가면서 서서히 증가하는 파상곡선을 보여준다(Fig. 10). 그러나 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O는 특히 응회환에서 불규칙적인 변

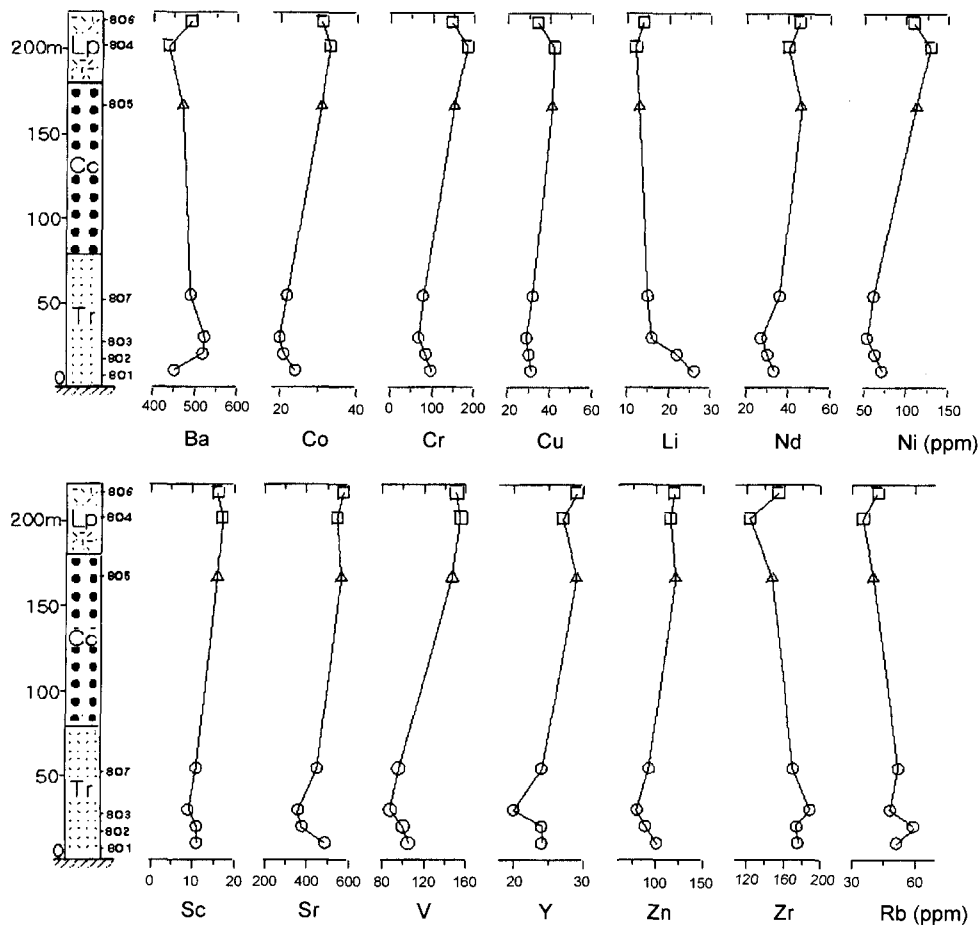


Fig. 11. Variations of trace elements across the vertical sequences of the Songaksan volcano. Lp stands for Lava pond; Cc, Cinder cone; Tr, Tuff ring. Symbols are the same as in Fig. 2.

화를 보인다. 이는 전체적으로 고철질 광물형성 원소들이 응회환 하부에서 중부까지 감소하다가 여기서부터 분석구와 용암연으로 갈수록 점차 증가되는 양상 때문이다. 반면에 규장질 광물을 주로 지배하는 원소들은 이와 반대 양상을 보이며 혹은 불규칙적 변화를 보이거나 변화폭이 작아서 그 규칙성이 인지되지 않는다. 이러한 변화는  $Fe_2O_{3t}$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ 와  $MnO$  등이 대체로 고철질 광물의 지배를 받고  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ 와  $K_2O$  등이 대개 석영과 장석의 지배를 주로 받는 데서 연유된다.

이 주원소 변화는 대체로 응회환에서 분석구와 용암연으로 상부로 가면서 일어나며, 이들의 화학적 구배는 매우 미약하다. 현저한 주원소 변화는 고철질 광물의 형성으로 제거된 원소들이 상부층으로 가면서 증가되는 것이다. 그러나 단위층 내에서는 이들의 화학성

이 뚜렷한 변화를 나타내지 않지만 응회환 내에서는 이의 하부에서 중부까지 고철질 광물형성 원소들이 감소하다가, 반대로 여기서부터 상부까지 증가하는 변화를 보이거나 혹은 산만하게 흩어진 불규칙한 변화를 보여준다. 층간의 전체적인 변화는 분별결정작용에 의한 마그마분화에 의한 것이고, 응회환 내의 변화는 아마도 폭발적 분출시의 외래물질의 유입량 차이에 의한 것으로 생각된다(황상구 외, 2001).

미량원소들의 거동은 주요 규산염 광물의 거동에 따라 변화하게 된다. Co, Cr, Cu, Ni, Sc, Sr, V와 Zn 등의 원소는 응회환의 하부에서 이의 중부까지 감소하다가 중부에서 분석구와 용암연으로 가면서 대체로 증가하는 파상곡선을 형성한다(Fig. 11). 이들 전이금속 미량원소는  $Fe_2O_{3t}$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ 와  $MnO$  등의 주원소 거동에 따르게 된다. 따라서 이 미량원소

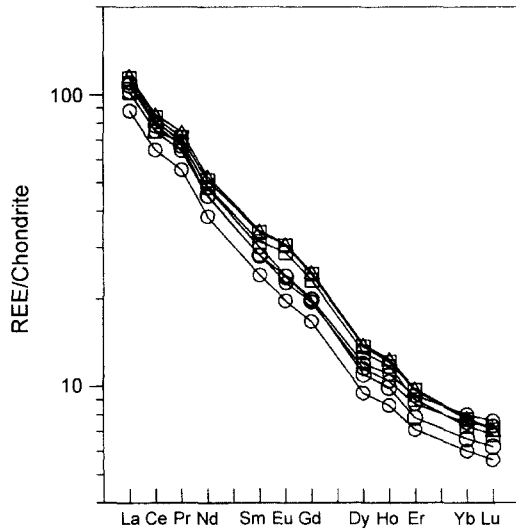


Fig. 12. Chondrite-normalized REE pattern of the rocks from the Songaksan volcano. Symbols are the same as in Fig. 2.

들은 모두 고철질 광물에서 추출되어 제거됨으로써 화학적 변화를 일으키게 된다. 반대로 Ba, Rb, Li 등의 미량원소는 액상에 남아 있거나 혹은 Ba과 Rb은 대개 K<sub>2</sub>O의 거동에 지배되고 Li은 MgO에 좌우된다. 따라서 이 미량원소는 주로 K-장석과 운모의 거동 즉 증감에 따라 하부에서 상부로 가면서 감소하는 양상을 보인다. 그러나 Ba과 Rb은 응회환에서 장석의 함량에 따라 비교적 복잡한 거동을 보여준다. Y는 중희토류원소(HREE)의 거동과 유사하므로 응회환보다 분석구와 용암연에서 더 풍부하다. 그러므로 Y이 응회환에서 더 적은 것은 주원소 TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 함량에 따라 거의 비례하여 거동하지만 석류석의 분화 흔적은 없기 때문에 티탄철석과 인회석의 분별결정작용과 연관된 것으로 생각된다. Zr 원소는 일반적으로 마그마에서 농도가 낮기 때문에 함량변화에 의한 거동을 추적하기는 어렵지만 대체로 후기 분화물에서 많이 함유되는 것으로 추정된다.

콘드라이트로 표준화한 희토류원소의 패턴은 그림 12와 같다. 이 패턴은 전체적으로 이 화산 내에서 여러 암층에 따라 큰 차이가 없다. 이 그림에서 (La/Lu)<sub>n</sub> 비가 14.0~17.4로서 경희토류(LREE)가 중희토류보다 14~17배 정도 더 심하게 부화된 특징을 보여준다. 콘드라이트에 비해 경희토류는 약 40~110배, 중희토류는 약 6~13배 정도 더 부화되어 있다. (Eu/Eu\*)<sub>n</sub>는 0.95~1.05로서 Eu의 부이상을 거의 나타내지 않는다. 그러나 암층별로 살펴보면 응회환에서는 (Eu/Eu\*)<sub>n</sub>가

0.95~0.99로서 약한 부이상을 보이고 하부로 갈수록 커지며 분석구와 용암연에서는 1.05로서 일정하게 약한 정이상을 보인다. Eu 이상치가 매우 작은 것은 마그마로부터 사장석의 이동이 강하지 않았음을 의미한다. 하지만 이는 초기에 분출한 마그마에서는 사장석이 분별결정작용으로 제거된 부분이고, 후기에 분출한 마그마는 사장석이 추가된 부분임을 시사한다.

전체적인 거동을 살펴보면 각 암층의 REE 패턴이 전체적으로 평행한 배치를 보이면서 응회환에서 분석구와 용암연으로 갈수록 높아진다. 즉 응회환에서의 REE 패턴이 분석구와 용암연에서의 것과 겹치면서 전체적으로 보다 아래에 놓인다. REE 패턴이 거의 평행한 것은 동원마그마에서 유래되었다는 것을 지지하고 분포 차이는 약한 조성구배를 의미한다. 그러므로 전술한 바와 같이, 이 조성구배는 아마도 분출되기 전에 마그마의 분별결정작용에 의해 조성이 약하나나 분대된 것을 시사한다. 이때 분별결정작용에 기여한 광물은 감람석, 휘석과 사장석의 복합적인 분별작용인 것으로 생각된다. 흔히 Eu 이상치는 사장석의 분별작용으로 일어난 것으로 볼 수 있다. 그러나 응회환에서는 기타 암층보다 아래에 놓이는 것은 알칼리 계열 분출물에 총희토류원소의 함량이 보다 적은 다른 계열(Henderson, 1984)의 외래물질이 개입된 것으로 생각된다. 이는 위의 분별작용에 폭발시의 국부적으로 추가되는 지각물질의 혼합을 지지하는 것으로 판단할 수 있다.

### 토 의

단성화산은 1윤회화산이라고도 하고 짧게는 수개월에서 길어도 수년을 넘지 않는 기간에 휴지기를 갖지 않고 단숨에 형성된다. 송악산은 3가지의 분출양식에 의하여 크게 3개 단위로 구성된다. 응회환의 분화구 내에 분석구가 형성되어 있고 응회환과 분석구 사이에 용암연을 형성하고 있어 연속적으로 뚜렷한 3개의 단위로 상하로 구성된다. 송악산에서 분출양식은 먼저 수인성화산작용으로부터 시작되었으며 스트롬볼리언분출을 거쳐 하와이언분출로 이어지는 분출활동으로부터 형성된 화산이다. 그리고 이 화산연속체 내에는 큰 침식을 나타내는 부정합은 발견되지 않는 1윤회의 분출활동에 의해 형성된 것이다. 종합하면 송악산 화산은 1윤회의 분출동안에 시간적으로 분출양식의 차이를 잘 보여주고 수직적으로 2개 이상의 화산체를 형성하고 있다. 그러므로 송악산 화산은 단성화산이고 복식화산이며 동시에 단성복식화산에 해당된다(황상구, 2000).

이와같이 단성복식화산은 1윤회의 분출동안에 화도에 지하수의 영향으로 환경변화를 일으켜 구성원의 조직변화를 일으킨 것이다.

그러면 이 단성복식화산 내에서 화학적 성질과 조성변화는 무엇을 의미하는지 알아보자. 이 화산에서 조성변화는 대체로 마그마저장소 내에서 분별결정작용으로 설명된다. 먼저 마그마는 감람석과 휘석 결정은 소량 정출하면서 액체의 조성변화를 일으키고 결정의 낙하로 위치에 따른 조성변화도 일으켰다. 마찬가지로 고철질 광물에 쉽게 들어간 호정성 미량원소도 고철질 광물의 이동으로 조성변화를 일으켰다.

결정의 자형 형태는 이 결정의 대부분이 마그마의 용융물에서 정출되었음을 암시한다. 그러나 응회환에서 석영과 정장석의 산출은 마그마 저장소를 떠난 후에 폭발지점에서 유입된 외래물질인 것으로 생각된다. 이러한 견해의 근거로서 이들이 유리편과 라필리 등의 분질편에서 발견되지 않고 파동소광을 하고 있으며, 결정 내에 얼룩진 핵부를 가질 수 있는 마그마 혼합작용이나 동화작용의 흔적이 나타나지 않는다는 사실 등을 들 수 있다.

이 화산 내에서 각 암층의 조성은 이들이 분출될 때 마그마의 조성과의 관계를 결정지어준다. 그래서 이러한 관계를 설명하기 위해서는 앞에서 제기되었던 분별결정작용과 외래물질의 혼입이 매우 중요하다. 분별결정작용 동안에 일어나는 결정의 하방낙하는 이 암층들의 조성변화를 해석하는데 있어 매우 중요한 기구라 할 수 있다. 적지만 분출전 마그마에서 결정의 하방낙하와 용융물의 상방이동이 일어난 것으로 보인다. 결정의 낙하가 결정분별작용의 유일한 기구라면 각 암층은 이들이 분출될 때 마그마와 같은 조성을 가질 것이다. 그래서 분석구와 용암연의 조면현무암 조성은 이 화산이 분출되기 전에 마그마 조성을 대표하게 될 것이며, 연속적으로 하부의 응회환 조성은 이 암층이 분출될 때 분별결정작용과 외래물질 혼입 등으로 원래보다 수정된 조성을 나타낼 것이다. 그래서 만일 선택적인 외래물질의 혼입이 일어났다면, 동시에 결정의 낙하가 있건 없던 간에 어느 암상도 분출시 마그마의 진짜 조성을 보존하지는 못할 것이다. 많은 화산분출물에 추가적인 혼입물은 응회환에서  $\text{SiO}_2$ 를 제외한 주원소 조성을 크게 변화시키지 못한 것 같다.

광역적인 기존 연구에 의하면 제주도 전체는 판내부의 열점 관련 화성활동(Lee, 1982; 박준범과 권성택, 1993; Lee *et al.*, 1994)으로 석류석 페리도타이트 맨틀 물질의 2-3%의 적은 부분용융에 의해 형성된 알칼리 마그마에 그 근원을 두고 있는 것으로 나타났다(박준

범, 1994; 박준범 외, 1996). 그러므로 이 화산에서 각 암층 간에 나타나는 조성차이는 본 알칼리 마그마가 주로 분별결정작용에 의한 분화에 의해 지배되었다는 것을 지시한다. 그리고 특히 응회환 내에서의 조성변화는 분출시에 폭발지점에서 외래물질의 혼입으로 인하여 부분적으로 큰 조성변화가 있었다는 것을 암시한다. 왜냐하면 제주도 화산암류는 해수면하 약 100 m 내외까지만 존재하고 그 이하는 미고결 퇴적층과 중생대 화성암류로 추정되는 기반암이 분포하기 때문이다(윤상규와 김원영, 1984; 고기원, 1991; 최순학 외, 1991; 박준범, 1994). 그러므로 응회환에서의 외래물질의 혼입을 제외하면 대부분의 조성변화는 분출전 주로 분별결정작용에 의해 지배되는 것으로 생각해야 한다.

송악산 화산에서 연속적인 조성변화를 이루는 것에 의하면 마그마저장소 내에서 조성누대는 이의 지붕에서 아래로 향하여 조면안산암질과 조면현무암질 성분으로 마그마 조성이 점이적으로 성층화되었음을 유추할 수 있다. 이러한 조성누대는 제주도 마그마저장고의 전부를 나타내지는 않고 일부에 해당될 것으로 간주된다. 마그마저장고로부터의 분출퇴각은 흔히 안정된 방출의 하향출조(downward tapping)에 의해서 일어나는 경우가 많다. 마찬가지로 송악산 화산을 형성시켰던 마그마도 대부분 이러한 절차를 밟은 것으로 생각된다.

송악산 화산에서 층서에 따른 조성변화는 이 화산을 분출시킨 저장소 내에서의 마그마 정보에 대한 시료가 된다. 응회환에서 나온 광물군과 화학적 자료는 이 암층을 분출시킨 마그마가 저장소의 상부에서 출조되었다는 것을 앞에서 토의한 바 있다. 이곳에서 응회환 마그마가 출조된 조성대(compositional zone)( $\text{SiO}_2$ , 52% 이상)는 분석구와 용암연이 출조된 조성대보다 윗 부분에서 출조된 것으로 나타난다. 이 조성대의 출조는 마그마저장소의 상층부에서 쉽게 일어날 수 있을 것으로 생각된다. 왜냐하면 이 조성대는 상층부의 지붕 근처에 국부적으로 존재하다가 이 부분이 화도로 쉽게 연결되어 압력에 의해 쉽게 밀려 올라갈 수 있기 때문이다. 그리고 이후에 이 조성대는 다음 분출된 분석구와 용암연의 조면현무암질 조성대( $\text{SiO}_2$ , 48-51%)로 연속된다는 것을 알 수 있다. 분석구와 용암연은 응회환이 출조되었던 조성대보다 더 아래에 존재했던 조성대로부터 출조되었다.

## 결 론

송악산 화산의 층서에 따라 시료를 채취하여 암석기

재, 암석화학적 변화를 추적함으로써 이 화산의 암석학적 진화는 다음과 같이 밝혀졌다. 송악산 화산은 응회환, 분석구, 용암연, 소분석구로 구성되는 작은 단성복식화산이다. 조성은 응회환의 안산암 성분에서 분석구와 용암연의 조면현무암 성분에 이르는 변화를 나타낸다. 응회환에서의 안산암은 분출시에 폭발지점에서 석영 등의 외래물질 혼입으로 다소 이탈된 것이며 이를 고려하면 원래 마그마 조성이 조면현무암에 가까운 조면안산암이다. 따라서 조성변화는 조면안산암에서 조면현무암까지 변하며, 제주도 화산암류에서 널리 인식되는 가장 진화된 조성과 더 원시적인 모조성 사이의 연속선에 놓인다. 그러나 전체적으로 이들은 분출전에 조성이 조면안산암에서 조면현무암으로 누대된 마그마 저장소에서 유래된 것으로 생각된다. 이 조성누대는 알칼리 마그마에서 분별결정작용에 의해 초래된 것이다. 결론적으로 송악산 화산은 조성누대된 마그마저장소의 상단으로부터 출조되고 다음에 계속적으로 아래의 더 고철질 마그마를 분출하였다.

사 사

이 연구는 송악산 화산에서 1990년도 시료를 채취하여 1993년도 영국 런던대학교 Walsh로부터 ICP-MS에 의해 시료를 분석하고 최근 이 단성화산의 화산과정에 따른 암석학적 진화를 다루게 되었다. 심사과정을 통하여 건설적인 논평을 해주신 경북대학교 김삼욱 교수님, 부산대학교 김진섭 교수님과 편집위원께 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포와 지하수와의 관계. 제27차 대한지질학회 학술발표회 요약집, 552.  
 김동학, 황재하, 황상구, 최성자, 1989, 제주도 화산활동 연구(II): 제주도 서부 지역의 화산층서와 분출사. 과학기술처 KR-88-(B)-4, 49p.  
 박기화, 조동룡, 김정찬, 2000, 모슬포. 한림도폭 지질보고서. 한국자원연구소, 56p.  
 박준범, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 화산층서에 따른 암석기재 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29, 39-60.  
 박준범, 1994, 제주도 화산암의 지화학적 진화. 연세대학교 대학원 이학박사 학위논문, 305p.  
 박준범, 박계현, 정창식, 1996, 제주도 화산암류의 Sr-Nd-Pb 동위원소 연구. 암석학회지, 5, 89-107.  
 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 관한 연구. 자원환경지질, 28, 513-518.

원종관, 1976, 제주도의 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12, 207-226.  
 원종관, 이문원, 윤성효, 고보균, 1998, 제주도 남동부 표선지역 화산암류의 지구화학적 특징. 지질학회지, 34, 172-191.  
 윤상규, 김원영, 1984, 제주지역 지열조사연구. 한국동력자원연구소, KR 83-5-08, 109-134.  
 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30, 521-541.  
 임성아, 고정선, 윤성효, 2000, 제주도 서부 송악산일대 알칼리현무암내 스피넬-레졸라이트 포획체 연구. 2000년도 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 18.  
 최순학, 김영기, 이동영, 1991, 제주도 임해지역에서의 해수침입. 광산지질, 24, 319-327.  
 황상구, 2000, 제주도 송악산 응회환 분석구 복합체의 화산형태. 지질학회지, 36, 473-486.  
 황상구, 원종관, 이문원, 윤성효, 2001, 제주도 송악산 단성화산의 조성변화와 그 원인. 2001년도 공동학술발표회 논문집, 한국암석학회, 71-74.  
 황상구, 황재하, 김동학, Howells, M.F., 1992, 제주도 송악산 응회환 분석구의 화산과정. 지질학회지, 28, 110-120.  
 原口九萬, 1931, 濟州島의 地質. 朝鮮總督府 地質調査所, 朝鮮地質調査要報, 10卷 1?, 72p.  
 Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 1990, Depositional mechanics and sequences of base surge, Songaksan tuff ring, Cheju Island, Korea. Sedimentology, 37, 1115-1135.  
 Henderson, P., 1984, Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 510p.  
 Hwang, S.K., Hwang, J.H., Kim, D.H. and Howells, M.F., 1991, Tuff cones and tuff rings, and their stratigraphic relationship on the western side of Cheju Island, Korea. Korean Inst. Mining Geol. 24, 399-408.  
 Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. J. Earth Sci., 8, 523-548.  
 Kim, D.H., Hwang, J.H., Hwang, S.K., Howells, M.F. and Reedman, A.J., 1986, Tuff rings and cones on Jeju Island, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 22, 1-9.  
 Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J. Petrol., 27, 745-750.  
 Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea. Sci. Rpt. Tohoku Univ., 3, 15, 177-256.  
 Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y. and Park, G.H., 1994, Stratigraphy and petrology of volcanic rocks in southern Cheju Island, Korea. J. Geol. Soc. Korea, 30, 521-541.  
 Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. Chem. Geol., 56, 207-218.

- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- Nakamura, E., Campbell, I.H. and McCulloch, M.T., 1989, Chemical geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *J. Geophys. Res.*, 94, 4634-4654.
- Nakamura, E., McCulloch, M.T. and Campbell, I.H., 1990, (Review) Chemical geodynamics in a back-arc region of Japan based on the trace element and Sr-Nd isotopic compositions. *Tectonophysics*, 174, 207-233.
- Nakamura, K., 1977, Volcanoes as possible indicators of tectonics stress orientation-principle and proposal. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2, 1-16.
- Wohletz, K.H., 1983, Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. In: Explosive volcanism (Ed. by M.F. Sheridan and F. Barberi). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 17, 31-63.
- 
- (2001년 1월 20일 접수, 2001년 2월 25일 게재승인)