

# XRF Analysis and Polarizing Microscopic Study of the Lava Cave Formation, Korea, Japan and Russia

沢 勲<sup>1</sup>·古山勝彦<sup>2</sup>·大橋 健<sup>1</sup>·金 昌植<sup>3</sup>·鹿島愛彦<sup>1</sup>

Isao SAWA<sup>1</sup>, Katsuhiko FURUYAMA<sup>2</sup>, Tsuyoshi OHASHI<sup>1</sup>, Chang-Sik KIM<sup>3</sup> and Naruhiko KASHIMA<sup>1</sup>  
(Osaka University of Economics and Law<sup>1</sup>, Osaka City University<sup>2</sup> and Jeju College of Technology<sup>3</sup>)

## ABSTRACT

### (1) Kaeusetgul Cave in Kimnyong-Ri, Jeju-Do, Korea.

Kaeuset-gul Cave (KC) is situated in NNE area of the Manjang-gul cave (125m a.s.l.). Kaeuset-gul Cave lies at 126°45'22" E in longitude and 33°33'09" N in latitude. The coast belong Kimnyeong-Ri, Kujwa-eup, Jeju-Do. Altitude of the cave-entrance is 10m and length of the cave is 90m. Lava hand-specimens of KC are studied by X-ray fluorescence analysis (XRF). Average major chemical components of specimens from KC is as follows (wt.%); SiO<sub>2</sub>=47.03, TiO<sub>2</sub>=3.16, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=18.41, FeO\*=13.53, MnO=0.14, MgO=5.05, CaO=8.66, Na<sub>2</sub>O=2.81, K<sub>2</sub>O=0.67, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.55 in KC. Polarizing microscopic study indicates that these specimens are described of alkali-basalt.

### (2) Tachibori Fuketsu (Cave) in Shizuoka Prefecture, Fuji Volcano, Japan

Tachibori Fuketsu lies at toward the south in skirt of the Fuji volcano, 138°42'04" east longitude and 35°18'00" north latitude. The location of cave entrance is 2745, Awakura, Fujinomiya-shi, Shizuoka Prefecture. The above sea level and length of Tachibori Fuketsu are 1,170 m and 82 m. Average major chemical components of specimens from cave are as follows (Total 100 wt.%); ( SiO<sub>2</sub>=50.52, TiO<sub>2</sub>=1.69, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=15.47, FeO\*=13.13, MnO=0.20, MgO=5.97, CaO=9.17, Na<sub>2</sub>O=2.52, K<sub>2</sub>O=0.94 and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>= 0.40). Polarizing microscopic study indicates that these specimens may belong to tholeiite-basalt series. According to polarizing microscopic study, Au (Augite), Pl (Plagioclase), and Ol (Olivine) are contained as phenocryst minerals.

### (3) Gorely Cave in Kamchatka Peninsula, Russia

Gorely caldera is located at the southeastern part of Kamchatka Peninsula, about 75km southwest of Petropavlovsk-Kamchatskiy. Gorely lava caves are situated in NNE area of Mt. Gorely volcano (1829m a.s.l.). One of lava cave (Go-9612=K-1) lies at 158°00'22" east longitude and 52°36'18" north latitude. The elevation of cave entrance is about 990m a.s.l. and the main cave extends in the NNW direction for about 50m by 15m wide and 5m in depth. The cave of K-3 is near the K-1 cave. Lava hand-specimens K-1 and K-3 caves are studied by X-ray fluorescence analysis and polarizing microscopic observation. Average major chemical components of specimens from these caves are as follows (wt.%); ( SiO<sub>2</sub>=55.12, TiO<sub>2</sub>=1.25, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=16.07, T-FeO\*=9.41, MnO=0.16, MgO=5.01, CaO=7.21, Na<sub>2</sub>O=3.39, K<sub>2</sub>O=1.92, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.45) and these values indicate that the Gorely basaltic andesite belong to high alumina basalt. Polarizing microscopic study indicates that these specimens are described of Augite andesite.

**Key words:** Lava Cave, Lava Stalactite, Polarizing Microscopic Study, X-ray Fluorescence Analysis

*World Congress of Korean Studies-Science&Technology-(Jeju National University) 2006.10.27-30*

## 1. 서 론

한국의 데이터는, 제주도에서 실시한 일한 공동 동굴 종합 학술 조사(2001-2003)의 일부이다. Kaeuset 굴(KC)은 만장굴 시스템의 일부에 해당해, 동섬북동부 해안에 위치한다. 행정상은 제주시 구좌읍 김녕리에 속한다. 김녕리 취락의 남동부에 동구가 있어, 거기의 수리 위치는 북위 33°33'09" ; 동경 126°45'22"이다 (Map.1.). 본동굴에 관해서는, 해안선으로부터 불과 100 수십 m 안 되는 위치에 있어, 해식동굴 혹은 용암 동굴과의 복합동굴인 혐의가 기대고 있어 한층 더 해안 용수나 해저 동굴과의 관련성도 흥미롭고, 그러한 점이 본동굴의 최초의 동기가 되었다. 제주 해협에 걸치는 용암 동굴 (해저 동굴)의 존재의 가능성이 큰 것이 예측되었다. 조사의 성과와 문제점에 대해서는 벌써, 일본 동굴 학회 (Ohashi 외, 2002)에 대하고 중간 보고를 실시해, 수편의 논문 (Ohashi,

2002.과 Sawa-Ohashi 등, 2002)이 보고하고 있다.

제 2 회 현지 조사 ( 2002 년 9 월 )로는, 한층 더 유사 조건을 가지는 해안에 있는 해면하 용암 동굴 (Kaeuset 굴 )에 일한 합동 조사를 시도했다. 조동층 ( 용암 )의 채취와 그 형광 X 선분석에 의한 조성, 동내수의 오염 상황을 분명히 하는 목적으로 수질 분석을 시도했다. 게다가 용암 동굴 주변 지구의 김녕 사굴등과의 관련, 해안 용수와의 관련, 해안 단구 나 이수빈 제철등과의 관련에 대해 검토했다.

일본의 데이터는, 시즈오카현 후지노미야시, Tachibori Fuketsu (표고 1,170m :총연장 82m 이상)에 있는 용암 (L) 과 용암 고드름석 (LS)의 형광 X 선분석 과 편광 현미경적 성격에 관한 학술 조사 (2004년 10월 31일)의 일부 이다. Tachibori Fuketsu 는 시즈오카현 아와쿠라 2745 번지에 소재해, 서구총 용암류 ( 서구총산의 표고 : 1,289m, 위도 35°17'59" ; 경도 138°42'46" )의, 위도 35°18'00" ; 경도 138°42'04"에 위치해, 표후지 그린 관광 주식회사 부지내 에 있다 (Map.2.). Tachibori Fuketsu 의 편광 현미경 관찰은, 용암 및 LS 의 종단면 (설형)의 외각과 핵 ( 중앙부) 및 횡단면 (원형)의 외각과 핵 (중앙부) 이다. 그 결과, 우선 형광 X 선분석에 의하면, 용암은 소레이이트이다. 다음에, 편광 현미경 관찰에 의하면 용암에는 보통 휘석 (Au = Augite)· 사장석 (Pl = Plagioclase) · 감람석 (Ol = Olivine) 반정이 인정되어, LS 에는, 유라 Au· Pl 과 Ol 이 인정되어, 양자의 차이가 확인되었다. 또한, 서구총 용암의 화학 조성이 처음으로 밝혀졌다. 또 LS 에 대해서는, 그 외형 내부 구조, 그리고, 어떻게 성장했는지, 등을 모을 수 있었다.

러시아의 데이터는, 캄차카 반도에서 실시한 일러 공동 동굴 종합 학술 조사 (2004)의 일부이다. Gorely 화산은 캄차카주도인 페트로파브로후스크의 남서측의, 북위 52°27' ; 동경 158°07'에 위치한다. 직경 13km×12 km 의 칼데라를 형성해, 폭발성의 분화를 하는 화산의 타입이다. 용암 동굴 (K-1)은, Gorely 화산의 북북서 방향에 있어, 북위 52°36'18" ; 동경 158°00'02"에 위치하고 있다. (Map.3.). 본격적인 학술 조사는 행해지지 않지만, BCRA (British Cave Research Association)는, 1996 년에 Kamchatka Lavatubes 의 조사를 실시해 South Tolbachik 화산에서 12 개의, North Gorely 화산에서 14 개의 용암 동굴의 측량도를 작성하다.

## 2. 동굴 주변의 지형·지질 개관

### 2. 1. 한국 제주도, 만장굴 시스템의 鑿鑿寺 (Kaeuset) 굴

제주도는, 한반도의 최남단에 위치한다. 제 3 기말부터 제 4 기의 처음에 분출한 현무암으로부터 되는 Hot Spot 형의 화산도이다. 제주도의 화산활동은, 제 3 기말에 개시해, 제 4 기전반에 주요한 활동은 종식하고 있다. 조기에 유출한 고기의 용암층은, 표고 200m 이하의 해안부의 완만한 대지를 만들고 있다. 한편, 제주도의 중앙부에 우뚝 솟는 한국의 최고봉, 한라산 (1950m)은 아스피-데를 관철하는, 종 모양 (톨로이드) 화산의 특징을 나타내, 제주도는 시대를 달리하는 화산체의 형성하는 북성화산이다. 제주도의 지질은, 현무암으로부터 되어 남부의 일부에 퇴적암을 볼 수 있다. 제주 화산도의 중심으로부터 동북과 서남을 연결하는 선, 서북과 동남을 연결하는 선 및 동서의 중간선으로 구분하면 각각의 지구에 많은 특징을 볼 수 있다. 동서의 중간선의 남쪽과 북측은, 각각 기생화산과 많은 동굴이 존재하고 있다. 현재까지 확인되고 있는 용암 동굴수는, 190 개 전후이며 (Hong, 1987), 그 중 조사가 실시된 것에 대해서는, Sawa·Ogawa·Ohashi·Kashima 등 (2001)보고은 약 60 개 이라고 하고있다 (Map.1.). 동굴의 대부분은, 북동부의 구좌읍과 북서부의 한림읍 및 애월읍에 집중적으로 분포하고 있다. 만장굴, 협세굴 및 Billemot 굴 동굴 시스템 등 본도의 대표적인 동굴도 여기에 발달하고 있다. 용암 동굴은 특정의 용암 지대 「점성이 작고, 알칼리 현무암층」 안에 형성되고 있어 단위면적 (1km<sup>2</sup>) 근처의 동굴 밀도라고 하는 점에서는, 제주도는 아시아 제 1 위이다.

### 2. 2. 일본 시즈오카현 후지노미야시, 후지산의 Tachibori Fuketsu 동굴

시즈오카현 후지산의 용암 동굴의 분포도는 Map.2. 과 같다. Tachibori Fuketsu 의 용암류 (의 암상) 은, 주로 적갈색을 나타내는 현무암질 화쇄암에 의해 형성되고 있다. 암석의 육안 검경·검사 결과에 의하면, 서구총 용암류의 용암은, 감람석·보통 휘석 현무암이다. Tachibori Fuketsu 의 특징은, 2 차 용암류가 흐른 후에, 형성된 동굴내의 용암의 흐름을 완전하게 확인하는 것이 불가능한 것에 있다. 동굴의 내부는, 폭락이 많아, 천정부에서는, 급냉각상을 나타내는 흑색의 광택의 다채로운 타입의 용암과 LS 가 있다. Tsuya (1938)는, 후지산의 암석학적 연구를 보고해, 한층 더 용암 동굴의 형성 모델을 고안 (1971) 했다. Tachibori Fuketsu 에 관한 보고 로서는, Koyama (1990)의 형태 구조의 조사가 있다.

Takahashi 외 (2003)는 후지 화산을 stage1-stage9 정원 자리수.고후지 화산은 stage1-5, 신후지 화산은 stage6-9에 상당한다. 그들은 847 개의 분석 데이터를 플롯 하고, 고후지 화산, 신후지 화산의 화학 조성의 특징을 나타냈다. 주화학 성분에서는 신후지 화산은 고후지 화산에 비해,  $FeO^*/MgO$  가 높은 것이 많이, 또,  $TiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  가 풍부하는 특징이 확인되었다. 이 847 개의 분석 데이터를 그래프화해, 서구층 용암의 분석치를 플롯 했다. 그 결과, 서구층 용암은, 신후지 화산안에서도  $FeO^*/MgO$  비가 낮은 측에 있다. 한편, 특히  $K_2O$ · $P_2O_5$  에 풍부해, 신후지 화산의 화학 조성의 특징을 가지는 것이 분명해졌다.

### 2. 3. 러시아 캄차카 반도, Gorely 동굴

캄차카 반도 (Kamchatka Peninsula)는, 유라시아 대륙의 동쪽 단부에 위치하는 러시아 연방 캄차카주에 속하고 있어 주도는 페트로파블로프스크-캄체츠키 (Petropavlovsk-Kamchatskiy)이다. 서쪽의 스투레닌누이 산맥(Shredinng Ridge -중앙 산맥:연장 900 km) 과 동쪽의 보스토치누이 산맥 (Vostochny Ridge-동부 산맥:연장 600 km)에 분포하고 있어, 약 300 개의 휴화산과 29 개의 활화산이 존재한다. Map.3.는, Gorely ·칼데라의 용암 동굴의 분포만을 타원형의 실선으로 표시하고 있다. 지금까지의 캄차카 반도에 있어서의 용암 동굴의 보고에는, 다음의 것이 있다.

Yokoyama (1992)는, 트르바티크 (Tolbachik) 화산의 1975-1976 년에 균열 분화한 현무암 용암중의 용암동에 입동 하고 있다. 후지산 화산 동굴 연구회는 1995 년 9 월에, 뉴 트르바티크 (The New Tolbachinsky) 화산의 남서 산록 (표고 1,199m-340m 부근)의 분석 구령군으로부터 1973 년에 유출한 용암류중의 3 개의 용암 동굴을 조사하고 있다. 오사카 경제법과 대학 “일러 공동 동굴 종합 학술 조사“은, 2004 년 8 월 러시아 암네이클립의 협력을 얻고, Gorely 화산의 용암 동굴의 조사를 실시했다.

캄차카 반도의 Gorely 동굴 K-1 (Go-9612) 및 K-3 동굴은 용암 동굴이며, 빙혈이기도 하다. K-1 동굴은 표고 990m, 길이 55m, 폭약 15m, 깊이 5m, 라바. 슈브의 전형적 형태를 세우고 있어 단면은 반원형을 이룬다. 주동의 방향은 북북서의 방향을 나타내, 기울면서 저하해, 동쪽도 커지고 있다. 그 하부에는 유동한 용암류가 침하한 자취나 함몰구가 있어, 폭락암괴가 동저에 퇴적한 채로, 동저-동벽-천개부에는 얼음을 볼 수 있다. 용암 종류등의 지물의 발달은 불량이다. 복수의 지동이 인정되어 일련의 동굴계를 구성해 있는 것이라고 생각할 수 있다.

## 3. 편광 현미경 관찰 및 고찰

### 3. 1. 한국 제주도, 용암 동굴과 용암수형

한국 제주도에 있는 용암 동굴과 용암수형의 용암 시료의 편광 현미경 관찰 결과는 다음과 같다. 만장굴산의 용암 석주 (Photo.1. 좌측)·용암 교 3F (Photo.1. 중앙의 하단부)의 시료에는 3 종류의 반정으로서 감람석·단사 휘석·사장석이 있어, 그리고 Billemot 굴산 (Photo.1. 우측의 상단부)·소천굴산 (Photo.1. 중앙의 상단부)·한림읍 산의 용암수형 (Photo.1. 좌측의 하단부)의 용암에는 감람석·사장석이 확인되었다. 그 결과, 편광 현미경 관찰에 의해서, 제주도에 있어서의 동북지방 (만장굴) 과 서북 지방의 반정의 차이가, 명백하게 확인할 수 있게 되었다.

### 3. 2. 일본 후지산, Tachibori Fuketsu 산 (용암 고드름석 : LS)

지금까지 후지산의 용암 동굴에 있는 LS 의 시료 박편의 편광 현미경 관찰 결과적으로는 Watanabe-Honma·Miwa (1991) 의 보고, Mitsuike lava tunnel 산의 용암 빨대 (횡단면과 종단면)에 대한 보고가 있지만, 용암 빨대의 각 부분에 있어서의 광물명은 기재되지 않았다. Tachibori Fuketsu 의 LS의 특징은 「흑색의 외각부는 두께 약  $10\mu m$  로 거의 불투명 광물 ( $Fe-Ti$  산화 광물이라고 생각된다)로부터 구성되어 있다 (Photo.2. 좌측). 외각부에서 내부에 두께 약  $40\mu m$  까지 (Mantle : 맨틀부)는, 한층 더 안쪽 (핵부)에 비해 세립이며, 한편 외각 안쪽에서 내부에 수직에 가까운 급각도로 침상의 Pl (사장석), Au (보통 휘석)가 성장한다. 또, 맨틀부의  $Fe-Ti$  산화 광물은 핵부에 비해 미세한 급내 성장의 형태를 이룬다」 것이다.

LS 의 횡단면 (원형:Photo.2. 중앙의 상단부) 과 종단면 (설형:Photo.2. 우측의 상단부)의 외각의 특징은, Glass (유리 / 최상부), Au (보통휘석 / 상부) 및 Pl (사장석 / 중앙과 하부)을 관찰할 수 있다. LS 의 횡단면 (원형 Photo.2. 중앙의 하단부) 과 종단면 (설형 : Photo.2. 우측의 하단부)의 핵의 특징은, Glass(유리 / 중앙부), Au (보통 휘석 / 중앙부) 및 Pl (사장석 / 우측)을 관찰할 수 있는 것이다. LS 의 맨틀부와 핵부는 Pl (사장석)

과 OI (감람석) 를 반정에 가지고 있다. 석기는 Pl (사장석), Au (보통 휘석), Fe-Ti 산화 광물 및 갈색의 Glass (유리)로부터 된다. 구성 광물 및 조직에 관해서 용암, LS 의 맨틀부, 핵부는 같다. LS 의 외각는, 지상에서 공중에 비산한 현무암 마그마가 급냉되고 유리 (페레-의 눈물, 페레-의 머리카락등)가 되는데 대해, Fe-Ti 산화 광물로부터 되는 것이 확인되었다.

### 3. 3. 러시아 캄차카, Gorely 용암 동굴

Gorely 산 용암의 편광 현미경 관찰 결과는, 반정은, 1~3 수 mm 의 자형~반자형의 사장석, 수 mm 이하의 반자형~타형의 보통 휘석으로부터 되는 반장 조직을 하고 있다. 사장석은 집편 쌍정을 이루어, 루대 구조의 현저한 것이 많아, 집반장을 이루는 것도 볼 수 있다. 보통 휘석은 자형을 이루는 것은 적고, 부정형의 보통 휘석만으로의 집 반장이나 사장석과 보통 휘석으로 집 반장을 이루는 것을 볼 수 있다. 석기는 인타서탈 조직 (전간장 조직)을 이루어, 0.1~0.3mm 정도의 흘쪽한 사장석이나 부정형의 보통 휘석의 사이를, 갈색의 유리장입상의 불투명 광물등이 충전하고 있다. 육안적 특징은 다공질인 흑색의 암석으로, 수 mm 이하의 백색의 사장석 반정이 눈에 띄는 존재이다(Photo.3. 좌측). 암석명은 보통 휘석 안산암이라고 인정할 수 있다 (Photo.3. 우측) .

## 4. 전암화학 조성 및 고찰

### 4. 1. 형광X선분석에 의한 전암화학 조성

제주도에 있어서의 용암 성분 분석치에 대해서, 만장굴 석주 (Sawa·Katayama,1989, Sawa·Murata-Hong, 1990 및 Sawa, 1990), 만장굴의 용암 성분 (Sawa-Murata-Kohno, 1996) 및 만장굴 용암교 (Sawa·Inoue, 1999·2000)등의 보고가 있다. 제주도에 있어서의 용암 (Sawa-Kawamura, 2000·와 Sawa 등, 2004·2005)등에 보고되고 있다. 제주도의 동굴산 화산 분출물의 SiO<sub>2</sub> 조성 범위는 47.03~53.10wt.%이다.

Tachibori Fuketsu 산의 용암의 화학 조성 (wt.%)는, Table.1.에 나타냈다. 이 숫자로 후지산에 있는 용암 동굴이라는 비교를 실시했다. Tachibori Fuketsu 의 SiO<sub>2</sub>=50.52 (wt.%)는, 후지산의 용암 동굴의 평균 암석치와 같은 정도이다. Tachibori Fuketsu 의 TiO<sub>2</sub>=1.69, MnO=0.2, K<sub>2</sub>O=0.96 와 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.40 (wt.%)는, 후지산에 있는 용암 동굴의 최대치로 동일한 정도이다. 한편, Tachibori Fuketsu 의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=15.47 와 CaO=9.17 (wt.%)는, 후지산에 있어서의 용암 동굴의 최소치와 같은 정도이다. 후지산에 있어서의 성분 분석치에 대해서는 지금까지, 주로 용암수형에 대해서는, Sawa·Tachihara (1998) 와 Sawa·Inoue·Ogawa 등 (2001)등의 보고가 있다. 후지산에 있어서의 동굴의 화산분출물의 SiO<sub>2</sub> 조성 범위는, 47.97~51.27wt.%이다.

캄차카에 있어서는, Gorely 용암 동굴의 용암 분석치에 대해서는, Sawa·Furuyama·Ohashi·Fujimoto ·Kashima·Kuwabara (2006)의 보고도 있다 (Table.1.). 화산분출물의 SiO<sub>2</sub> 조성 범위는, 50.06~55.85wt.% 것이다.

### 4. 2. 규산과 알칼리 성분(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)과의 관계

규산과 알칼리 성분 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 와 SiO<sub>2</sub> 와의 관계는, 알칼리 현무암 계열 (A), 고 아르카리 소레아이트 (고 알루미늄 현무암) 계열 (HT) 과 저 아르카리 소레아이트 계열 (LT)의 3 개의 범위에 구분할 수 있다. 제주도에 있어서의 용암 동굴산 용암의 규산 (47.03~53.10wt.%) 과 알칼리 성분 (2.90~4.49wt.%)의 관계에 대해서는, Fig.1.윗 그림에 나타내 있다. 그림중의●표시는, Kacuset 굴산의 용암이다. 제주도에 있어서의 용암은, 알칼리 현무암 계열 (A) 과 저 아르카리 소레아이트 계열 (LT)에 속하고 있다. 용암 동굴은 주로 현무암이다.

후지산의 몇개의 용암 동굴의 성분 분석치는, Table.1.에 나타냈다. 이번 분석치를 나타낸 Tachibori Fuketsu 출산의 용암은, 고 아르카리 소레아이트 (고 알루미늄 현무암) 계열 (HT) 속한다 (Fig.1.중앙도). 후지산의 용암은 현무암질로부터 유문암질까지 조성 범위가 넓은 가운데 용암 동굴은 주로 현무암에 분포하고 있다. 후지산으로 보여지는 용암 동굴의 용암은, SiO<sub>2</sub>가 증가하는 것에 따라, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)도 증대의 경향이 있다.

캄차카 반도산의 분석치는, 고 아르카리 소레아이트 (고 알루미늄 현무암) 계열 (HT) 속한다.용암의 규산 (50.06~55.85wt.%) 과 알칼리 성분 (2.86~5.35wt.%) 과의 관계를 고찰했다 (Fig.1.밑그림). 캄차카 반도로 보여지는 용암의 알칼리 성분은, SiO<sub>2</sub>가 커지는 것에 따라, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)도 커지는 경향이 있다.

### 4. 3. 규산(SiO<sub>2</sub>) 과 산화 칼륨 성분(K<sub>2</sub>O) 과의 관계

규산과 산화 칼륨 성분과의 관계는, high-k, medium-k 과 low-k 의 3 개의 범위로 구분된다. 제주도산 있어서의 용암은, 이 3 개의 범위(high-k, medium-k 과 low-k)에 걸쳐서 있다. 규산 (47.03~53.10wt.%)과 산화 칼륨 성분(0.36~1.54wt.%)의 관계를 비교했다 (Table.1.과 Fig.2.윗 그림). Fig.2.윗 그림의 ●표시 ( $\text{SiO}_2=47.03\text{wt.}\%$  과  $(\text{K}_2\text{O}=3.48\text{wt.}\%)$ )는, Kaeuset 굴산의 용암이다. 제주도산의 용암은,  $\text{SiO}_2$ 가 많아지는 것에 따라, 산화 칼륨이 감소하는 경향이 인정된다.

후지산산의 용암의 규산과 산화 칼륨 성분과의 관계를 구명하기 위해, 규산 (47.97~51.27wt.%)–산화 칼륨 성분 (0.52~0.96wt.%) 그림에, 각각의 용암의 화학 조성을 플롯 했다 (Table.1.과 Fig.2.중앙도). Fig.2.중앙도의 ●표시는, Tachibori Fuketsu 산의 용암이다. Tachibori Fuketsu 산을 포함한 후지산의 용암 동굴의 산화 칼륨 성분은, medium-K 의 영역인 것을 확인할 수 있었다. Tachibori Fuketsu 산의 용암의 산화 칼륨 성분 (0.94wt.%)에 대해서는, 비교한 후지산의 동굴안에서는 최대치를 나타내고 있다.

캄차카 반도의 동굴산 용암의 규산 (50.06~55.85wt.%) 과 산화 칼륨 성분 (0.27~1.96wt.%) 과의 관계를 검토했다. Fig.2.밑그림의 ●표시는, Sawa·Furuyama·Ohashi·Fujimoto·Kashima·Kuwabara (2006)에 의한 Gorely 동굴산의 용암이다. Gorely 동굴 용암의 산화 칼륨 성분은 high-k 의 영역이다. 한편, Sawa·Furuyama·Ohashi·Fujimoto·Kashima·Kuwabara (2006) 이외의 Tatsumi·Kogiso·Nohda (1995)에 의한 산화 칼륨 성분은, 현무암질 과 현무암질 안산암의 범위의 low-k의 영역에 있고,  $\text{SiO}_2$ 가 커지는 것에 따라  $\text{K}_2\text{O}$ 도 완만하게 커지는 경향을 나타내고 있다.

## 5. 만장굴 시스템내의수질 분석 및 고찰

Kaeuset 굴의 성인은 용암 동굴이며, 해식 동굴은 아니다. 그 하부에는 유동한 용암류가 침하한 지취, 동저에는 유수를 볼 수 있다. 남쪽으로 지동이 있어, 연결동이다. 북단은 해면하 용암 동굴인, 해저 동굴의 가능성이 대이다. 수질 분석의 결과로부터 동내수의 수질 오염은 거의 인정받지 못한다.

생물학적 산소 요구량 (BOD)에 관한 시험 방법과 배수 기준은 JIS K 0102 과 160(mg/l)이다. 만장굴 동굴 시스템내의 수질 시험 분석치는, 만장굴 = 26(mg/l) : Sawa (1997), Kaeuset 굴 = 1(mg/l) : Sawa (2005)이다. 화학적 산소 요구량 (COD) 의 시험 방법과 배수 기준은 JIS K 0102 과 160(mg/l)이다. 환경기준은 2(mg/l)이다. COD 에 관한 만장굴 동굴 시스템 내외의 수질 시험 분석치는, 만장굴 = 1.5(mg/l) : Sawa (1997), Kaeuset 굴 = 1.1(mg/l) : Sawa (2005), 동김녕리해안 = 1.4(mg/l) : Sawa(2005)이다. 게다가 Cu 함유량 (배수 기준 3(mg/l)의 0.3 미만), Zn 함유량 (배수 기준 5(mg/l)의 0.5 미만), 용해성 Fe 함유량과 용해성 Mn 함유량 (배수 기준 10(mg/l) 의 1 미만) 및 F 함유량 (배수 기준 8(mg/l) 의 0.01) 미만 인 것이 확인되었다.

## 6. 결론

제주도, 김녕리의 Kaeuset 굴의 조동층의 형광X선분석의 결과는, 다음과 같게 요약할 수 있다. Kaeuset 굴 용암의  $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}^*$ 과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 은, Table.1.안의 값으로는, 최대의 함유율을 나타내,  $\text{SiO}_2$ , MnO 와 MgO 는, 최소의 함유율을 나타내고 있다. Kaeuset 굴 용암은  $\text{SiO}_2$ 와  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 의 관계로부터 알칼리 현무암인 것이 분명해 졌다.

Tachibori Fuketsu 의 형광 X 선분석 (용암) 과 편광 현미경 관찰 (용암과 용암 고드름석)의 결과는, 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선, 형광 X 선분석에 의하면 용암은 고 알루미늄 현무암이다. 다음에, 편광 현미경 관찰에 의하면 용암에는, LS 의 핵부 모두 반정으로서 Au·Pl 과 Ol 이 인정된다.또, LS 는 조직에 의해 겹겹데기-맨틀핵으로 나눌 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

러시아, 캄차카 반도의 용암 동굴에 있고, Gorely 화산에 있는 동굴에 대해서는, 동굴을 배태하는 용암의 화학 조성 분석에 의하면, Gorely 동굴의 시료 (K-1 과 K-3)에 있어서의  $\text{SiO}_2$  (55.12 ; 55.09 wt.%),  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  (5.31 ; 5.35 wt.%) 의 고 알루미늄 현무암이다. 다음에, 편광 현미경에 의한 관찰에 의하면 보통 휘석 안산암이다.

## 사 사

이 논문 작성에 , 보도에 대해서는, 한국방송공사 KBS 의 김양주 전국장, 제주문화방송 MBC 의 오석훈 전국장 과 송창우취재부장의 텔레비전 보도의 관계자에 대해서, 그리고, 제주 일보사의 부영주 부사장 과 한문성 편집국차장, 한나일보사의 변창운 전사장 과 강만생사장과의 신문보도의 관계자에 대해서, 많은 협력에 깊게 감사의 뜻을 드립니다.

현지 동굴 조사에 동반한 탐험가 및 연구자인 康勝三 이학박사, 朴景允 공학박사, 金炳宇 이학박사, 金周煥 이학박사, 蘇大和 공학박사, 尹正模 공학박사, 洪忠烈 문학박사, 皇甫相源 지적 기술사, 金源振 이학박사에 감사의 뜻을 나타냅니다. 동시에 제주도에는 金君天과 원종진의 만장굴 개발자, 협세굴 시스템의 관계자, 강세업 미천굴주, 申裕泳회장, 姜淳錫 이학박사, 高東燾 농학박사, 金福心전교장부인, 金景植교장에 감사의 뜻을 나타냅니다.

### 参 考 文 献

- 1) 津屋弘達(1938)「富士山の地質学的並に岩石学的研究(Ⅱ)」. 東京大学地震研究所彙報 16:638-657.
- 2) R.W.Le Maitre(1939)『A Classification Igneous Rocks and Glossary of Terms』.Blackwell Scientific Publications
- 3) H.Kuno(1960)「High-alumina Basalt」. J.Petrol. 1:121-145.
- 4) 津屋弘達(1971)「富士洞窟分布図」. 国土交通省中部地方整備局 2001年6月
- 5) T.D.Ford・C.H.D.Cullingford(1976)『The Science of Speleology』.Academic Press 593pp
- 6) 上野俊一・鹿島愛彦(1978)『洞窟科学入門』. 講談社 233pp
- 7) A.Miyashiro(1978)「Nature of Alkali Volcanic Rock Series. Contrib」. Mineral.Petrol. 66:94-104.
- 8) R.W.Le Maitre(1978)『A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms』. Blackwell Scientific Publications.
- 9) 沢勲・片山佐一(1989)「済州火山島における萬丈窟双子石柱の化学分析」.大阪経済法科大学論集 36:1-26.
- 10) 沢勲・村田守・洪始換(1990)「大韓民国萬丈窟双子溶岩石柱についての二、三の知見」.日本洞窟学会誌 15:42-46.
- 11) 沢勲(1990)「Fundamental Parameter 法による萬丈窟溶岩石柱の蛍光X線分析」.洞窟 22:17-56.
- 12) 小山賢之輔(1990)「立堀風穴調査報」. 日本火山洞窟協学会報 27:2-2-8.
- 13) 大佐古孝(1990)「立堀風穴の形態構造」. 日本火山洞窟協学会報 27:1-2-10.
- 14) 渡部景隆・本間久英・三輪洋次(1991)「富士山古期溶岩流中の三ッ池穴産溶岩ストロー中に見られる磁鉄鉱の形態とその解釈」. 地学教育 44-1:7-19.
- 15) 諏訪彰(1992)『富士山—その自然のすべて—』. 同文書院 355pp.
- 16) Y.Tatsumi・T.Kogiso・S.Nohda(1995)「Formation of a third Volcanic Chain in Kamchatka : Generation of Unusual Subduction-related Magmas」.Contrib Mineral Petrol. 12:117-128.
- 17) 沢勲・村田守・河野久征(1996)「白頭山の鹿蹄洞と済州火山島の萬丈窟における溶岩洞窟の成分比較」.洞窟学雑誌 21:65-70.
- 18) C.Hill・P.Forte(1997)『Cave Minerals of the World』. (2<sup>nd</sup> ed):217-218.
- 19) 沢勲・井上久(1999)「X-ray Fluorescence Analysis and K-Ar Age Determination of a Lava Bridge in Manjang-gul Cave, Korea」.洞窟学雑誌 24:57-63.
- 20) 沢勲・井上央・立原弘(1998)「富士山の柏原と青木ヶ溶岩樹型の成分比較」.洞窟学雑誌 23:39-45
- 21) 沢勲・井上久・河野久征(2000)「X-ray Analysis and K-Ar Age Determination on Lava Bridge in Manjang-gul Cave」.大阪経済法科大学論集 76:37-56.
- 22) 沢勲・川村一之(2000)「萬丈窟と富士山の溶岩に関する成分の比較」.愛媛大学鹿島愛彦教授退官記念論集 153-157.
- 23) 沢勲・大橋健(2001)「済州道の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態」.大阪経済法科大学論集 79:37-83.
- 24) 沢勲・小川孝徳・大橋健・鹿島愛彦・金昌植・洪忠烈(2001)「韓国 済州道の火山・溶岩洞窟の分布」.大阪経済法科大学論集 81:67-122.
- 25) 大橋健(2001)「溶岩洞窟の形成に関する地形学的研究—韓国済州道朝天邑橋来里巨文岳の事例—」.大阪経済法科大学論集 81:39-65.
- 26) 大橋健(2002)「宇宙衛星画像から見た済州道(その1)」.大阪経済法科大学論集 84:47-58.
- 27) 沢勲・小川孝徳・立原弘・鹿島愛彦・川村一之・勝間田隆吉・本多力・肥塚義明(2002)「富士山、静岡県にある火山・溶岩洞窟の分布-ITによるデータベース化にむけて3ヵ国語(日・英・韓)表記-」. 大阪経済法科大学論集 82:67-115.
- 28) 高橋正樹・小見波正修・根本靖彦・長谷川有希絵・永井匡・田中英正・西直人・安井真也(2003)「富士山噴出物の全岩化学組成—分析データ 847 個の総括—」.日本大学文理学部自然科学研究所紀要. 38:117-166.
- 29) R.A.Corsaro・S.Calvari・M.Pompilio(2005)「Formation of Lava Stalactite in the Master tube of 1792-1793 Flow Field, Mt.Etna」. American Mineralogist, 90:1413-1421.

- 30) 沢勲・鹿島愛彦・庫本正・藤井厚志・金炳宇・金周煥・大橋健・勝間田明男(2004)『洞窟学 4 力国語(英日韓中)用語集』増版大阪経済法科大学出版部 203pp
- 31) 沢勲・大橋健・井上央・金炳宇・皇甫相源・金昌植(2005)「韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟(ケウセツ窟)の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析」. 大阪経済法科大学論集 89:1-29.
- 32) 沢勲・古山勝彦・大橋健・藤本和貴夫・鹿島愛彦・桑原武志(2006)「ロシア、カムチャツカ半島の自然と洞窟—ゴレーリ火山の溶岩洞窟について—」. 大阪経済法科大学論集 90:1-24.
- 33) 沢勲・鹿島愛彦・大橋健(2006)『洞窟科学入門-写真と図解』大阪経済法科大学出版部 171pp
- 34) 沢勲・鹿島愛彦・大橋健(2006)『洞窟科学入門-写真と図解』DVD 版大阪経済法科大学出版部.
- 35) 大橋健・籠正二・鹿島愛彦・桑原武志・沢勲・藤本和喜夫(2006)『ロシアの火山・氷河・洞窟』大阪経済法科大学環境地圏研究会.
- 36) 大橋健・籠正二・鹿島愛彦・桑原武志・沢勲・藤本和喜夫(2006)『ロシアの火山・氷河・洞窟』DVD 版大阪経済法科大学出版部.