

# 남극 탈로스 돔(Talos Dome) 얼음코어 테프라층에 기록된 홀로세 멜버른 화산 분출 기록

이미정<sup>‡</sup> · 이종익

한국해양과학기술원 부설 극지연구소

## 요 약

남극 빙하의 얼음코어에 기록된 테프라는 절대연령 획득이 어려운 최근의 화산분출 시기복원에 유용하다. 본 연구에서는 홀로세 시기의 탈로스 돔 얼음코어에 기록된 눈으로 확인할 수 있는 6매의 테프라 시료와 이들의 기원화산으로 추정되는 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산암류들의 지구화학 조성 비교를 통해 남극 북빅토리아랜드 멜버른 프로빈스 화산들의 분출시기를 검토하였다. 탈로스 돔 얼음코어의 TD85 테프라와 멜버른 화산 동쪽 사면에 두껍게 퇴적되어 있는 멜버른 테프라(MMTep)의 주성분원소 조성 비교 결과, 이들은 동일한 화산분출의 산물로 해석된다. 이 결과는 최근까지 논란이 되어온 멜버른 화산의 마지막 분화시기를 규정할 수 있는 매우 중요한 발견이며, 멜버른 화산의 마지막 분화는 TD85 테프라의 연령인 약 AD 1280년에 일어났음을 지시한다.

**주요어:** 탈로스 돔, 얼음코어, 테프라, 멜버른 화산, 마지막 분화

**Mi Jung Lee and Jong Ik Lee, 2017, Holocene eruptive history of Mt. Melbourne volcano, Antarctica: insights from tephra layers recorded from Talos Dome ice core. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 4, p. 509-519**

**ABSTRACT:** Tephra recorded in the Antarctic ice cores are useful for reconstruction of eruptive history of young volcanic activities in case of not being available of their radiometric ages. This study examines major element compositions of six visible tephra layers for the last 10,000 years of the ice core drilled at Talos Dome, Northern Victoria Land, East Antarctica. By comparison of their geochemical signatures to lava compositions from Mt. Melbourne, Mt. Rittman and The Pleiades volcanoes which are considered as possible source volcanoes, we discussed the eruptive history of Holocene volcanic activity in Melbourne Province of Northern Victoria Land, Antarctica. A strong geochemical correlation is observed between TD85 in the Talos Dome ice core and thick tephra layer from eastern flank of Mt. Melbourne (MMTep), which confirms they were derived from the same eruptive source. This is a very important finding for determination of timing for the last eruption of Mt. Melbourne, which indicates that the last eruption of Mt. Melbourne occurred at AD1280.

**Key words:** Talos Dome, ice core, tephra, Mt. Melbourne, the last eruption

(Mi Jung Lee, Division of Polar Earth-System Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea; Jong Ik Lee, Unit of Antarctic K-route Expedition, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

## 1. 서 론

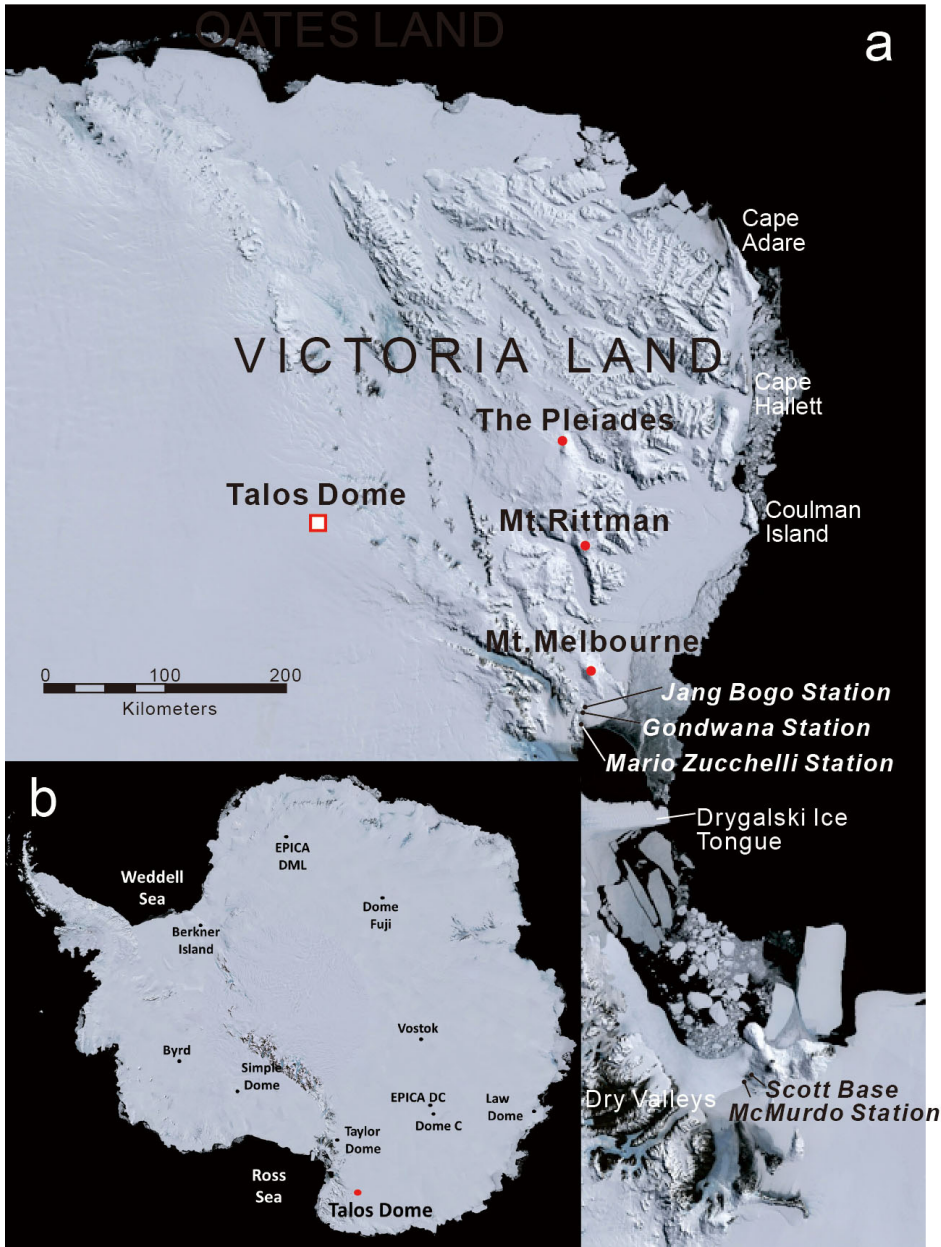
활화산의 일반적인 정의에 따르면 역사시대 화산 분출의 기록이 남아 있는 화산을 활화산으로 분류한다. 하지만, 남극의 경우 화산활동에 대한 모니터링이 시작된 지 60년 정도 밖에 되지 않았기 때문에 활

화산 분류의 중요한 기준으로 분기공가스 분출활동 혹은 분화구 주변에서 지열활동에 의한 열수변질작용 증거 등이 고려된다. 이러한 기준에 따르면, 장보고 기지를 중심으로 북쪽 300 km 반경 내에 3개의 활화산 즉, 멜버른(Mt. Melbourne; Nathan and Schutle, 1967; Wöner and Viereck, 1989), 리트만(Mt. Rittman;

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-32-760-5435, E-mail: [mjlee@kopri.re.kr](mailto:mjlee@kopri.re.kr)

Bonaccroso *et al.*, 1991), 플리아이디(The Pleiades; Kyle, 1982; Esser and Kyle, 2002) 화산이 분포한다(그림 1a). 이 세 활화산은 맥머도 화산그룹(McMurdo Volcanic Group)의 멜버른 프로빈스(Melbourne Province) 화산암류로 분류된다(Kyle, 1990). 맥머도 화산그룹은 서남극 열개구조의 발달과 관련된 일

련의 화산활동으로 분출된 알칼리 화산암류로서 북빅토리아랜드 케이프 아데어(Cape Adare) 지역부터 로스섬의 에레부스 화산까지 로스해 주변과 남극 종단 산맥 일대 길이 약 800 km에 달하는 광범위한 지역에서 약  $10^6$  km<sup>3</sup> 넘게 대규모로 산출된다(Kyle, 1990; Behrendt, 1999).



**Fig. 1.** (a) Map of Victoria Land (Antarctica) showing the location of Jang Bogo Station and active volcanoes referred to in the text, (b) location of ice-core sites in Antarctica.

멜버른 화산(74.35°S 164.7°E)은 해발 2730미터 높이의 성층화산으로 대한민국 남극 대륙 장보고 과학기지에서 북쪽으로 약 30 km 떨어진 곳에 위치한다(그림 2a). 화산 정상부 주변에서 최근까지 분기공 가스분출이 주기적으로 관찰되고 있으며(그림 2b), 화산가스가 그대로 얼어붙어 만들어진 많은 얼음굴뚝들이 발견된다(그림 2c와 2d). 또한, 활발한 분기공 가스분출과 더불어 화산체 동쪽 사면 눈 위에 그대로 노출되어 있는 두꺼운 테프라 층(그림 3a)을 고려할 때 마지막 화산분출이 수백년 이내의 최근의 사건일 것이라 추정되고 있다(Lyon, 1986).

일반적으로 화산 폭발지수(Volcanic Explosivity Index)가 4이상의 플리니언식 폭발(Plinian eruption)은 산성질 용암의 분화 혹은 용암과 물 또는 얼음 등이 반응하는 경우 발생하는 것으로 알려져 있다(LeMasurier and Thomson, 1990). 남극 심부 얼음코어들에 기록된 테프라 층들을 분석한 결과에 의하면 마리버드랜드 지역의 Mt. Takahe와 Mt. Berlin 화산은 산성질 용암의 화산분화로 화산 폭발지수 4

이상의 플리니언식 분출이 있었던 것으로 보고되고 있다(Wilch *et al.*, 1999; Dunbar *et al.*, 2008). 멜버른 화산 또한 잠재적 분화가능성을 지니는 활화산으로, 최근 분출한 용암의 조성이 폭발성 분화가 가능한 조면암질 성분이고 주변이 빙하와 눈으로 둘러싸인 환경이기 때문에 화산분화가 시작될 경우 커다란 폭발을 동반할 가능성이 크다. 멜버른 화산이 분화할 경우, 2010년 아이슬란드 빙하지대에서의 에이야프얄라요쿨(Eyjafjallajökull) 화산폭발과 비슷한 심각한 화산재 발생과 재해가 예상되는 만큼 화산 분화시기 예측을 위한 과거 분출역사 복원 및 화산감시 시스템 구축이 시급한 실정이다.

젊은 화산의 분출역사 및 층서 복원을 위해서는 정밀한 연대측정 자료와 상호관계를 잘 관찰할 수 있는 양호한 야외 노두 연결면 등에 대한 조사가 필요하다. 그러나 남극의 경우, 대부분 암석들이 눈으로 덮여 있어 노두가 많지 않을 뿐더러 빙하나 크레바스의 위험으로 접근 또한 쉽지 않다. 멜버른 화산의 경우 1985년부터 테라노바베이(Terra Nova Bay)



**Fig. 2.** Helicopter views of Mt. Melbourne and Jang Bogo Station. (a) Mt. Melbourne and Jang Bogo Station from the south, (b) volcanic gas emission from Mt. Melbourne, (c)-(d) fumarolic activity and ice chimneys near the summit of Mt. Melbourne.



에 마리오주첼리 기지(Mario Zucchelli station, 그림 1a)를 운영하고 있는 이태리 연구팀과 곤드와나 하계기지(Gondwana station, 그림1a)를 가지고 있는 독일 연구팀에 의해 멜버른 성층화산을 포함한 주변 화산암류에 대한 지구화학적 특성 및 성인에 대한 많은 연구 결과가 보고된 바 있으나(Wöner and Viereck, 1989, 1990; Wöner *et al.*, 1989; Wöner and Orsi, 1990; Armienti *et al.*, 1991; Rocholl *et al.*, 1995; Nardini *et al.*, 2009), 최근 분출역사와 층서 복원을 위한 연구결과는 매우 드물다. 지금까지 보고된 멜버른 화산의 가장 젊은 암상에 대한 절대 연대 측정 결과는  $0.01 \pm 0.02$  Ma (K/Ar dating; Armstrong, 1978)과  $35 \pm 22$  ka (Ar-Ar dating; Giordano *et al.*, 2012)이다. 두 결과 모두 화산분출 당시 잉여  $^{40}\text{Ar}$ 의 존재 가능성으로 인해 오차가 매우 크다. 한편, Lyon (1986)은 멜버른 동쪽 사면부에서 관찰되는 테프라(그림 3a)와 테프라를 덮고 있는 수 센티미터의 얇은 얼음 층(그림 3b)을 바탕으로 마지막 분출이 1862년과 1922년 사이에 있었을 것이라 추정하였다.

남극 화산분출의 기록은 화산암에 대한 절대연령 측정으로부터 직접 복원할 수도 있지만, 남극빙하에 기록된 테프라를 분석함으로써 간접적인 방법으로도 유추할 수 있다. 특히, 매우 젊은 화산의 경우 방사성 동위원소 시스템을 이용한 정밀 절대연령 자료를 획득하기가 매우 어렵기 때문에, 연대가 잘 복원된 얼음코어 층에서 테프라가 발견될 경우 지구화학 조성 비교를 통해 테프라의 기원화산을 유추하고 화산분출 시기를 정확하게 복원할 수 있는 커다란 장

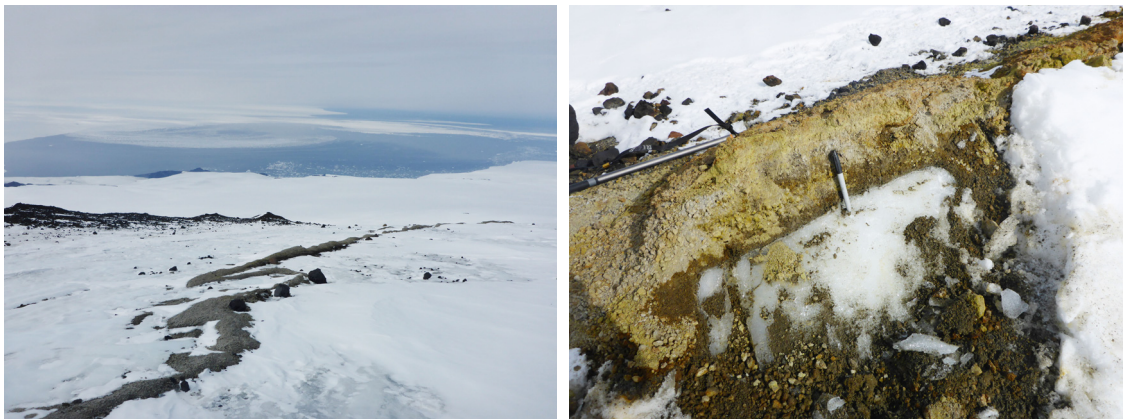
점을 지닌다(Dunbar *et al.*, 2003, 2008, 2010; Narcisi *et al.*, 2010a, 2010b, 2012, 2016, 2017).

남극에는 과거환경과 기후변화복원 연구를 위해 여러 빙하지역에서 수십만 년의 기록을 지니는 얼음코어들이 회수되었다(그림 1b). 이들 얼음코어들 중 탈로스 돔 빙하지대 얼음코어는 장보고기지와 가장 가까운 곳에서 심부 시추된 얼음코어로 빅토리아랜드 화산활동의 기록들이 가장 많이 기록되어 있는 것으로 알려져 있다(Narcisi *et al.*, 2010a, 2010b, 2012, 2016, 2017).

이러한 선행 연구결과를 바탕으로, 본 연구에서는 탈로스 돔 얼음코어에 기록된 만년 이내의 테프라 층들과 멜버른, 리트만, 플리아이디 일대 화산암류에 대한 지구화학 조성을 면밀히 비교 검토한다. 이를 통해 탈로스 돔 얼음코어에서 최근 만년 이내 멜버른 프로빈스 화산활동으로 기록된 테프라 층을 구분하고 얼음코어 연령자료 대비를 통해 멜버른 프로빈스 화산들의 최근 분출 시기를 논의한다. 특히, 멜버른 화산의 가장 젊은 암상인 동쪽 사면 테프라(멜버른 테프라, MMTep)와 정상부 화산암류(Mt. Melbourne Summit volcanics, MMSum)들의 지구화학 조성과 유사한 테프라기록을 추적하여 멜버른 화산의 최근 분출연대를 규명하고자 한다.

## 2. 연구방법

남극빙상 로스해 주변의 환경과 과거 기후변화 기록을 복원하기 위해 이태리, 프랑스, 독일, 스위스,



**Fig. 3.** Tephra layer in the eastern flank of Mt. Melbourne. (a) thick tephra layer composed of pumice and crystals, (b) yellowish grey trachytic, pumice lapilli embedded up to 20 cm in ice.

**Table 1.** Details for the visible tephra layers from the Talos Dome ice core.

Sample	Bottom depth (m)	Age yr BP <sup>a</sup>	Maximal grain size ( $\mu\text{m}$ )	Method for single shard chemical analysis	Suggested source
TD85	84.37	670 $\pm$ 7 (AD 1280)	100	WDS	Melbourne
TD87	86.2	694 $\pm$ 7 (AD 1256)	80-90	WDS	Melbourne & Mt Berlin
TD238	237.31	2684 $\pm$ 47	80	WDS	Melbourne
TD239	238.12	2699 $\pm$ 48	100-150	WDS	Melbourne
TD388-1	387.76	5277 $\pm$ 49	60	WDS	Melbourne
TD388-2	387.77	5277 $\pm$ 49	40	WDS	Melbourne

<sup>a</sup>Age according to Severi *et al.* (2012). BP stands for before 1950 AD. Data source is from Narcisi *et al.* (2012).

영국 등이 참여한 유러피언 TALDICE 빙하시추 프로그램(www.taldice.org)을 통해 탈로스 돔(72°49' S 159° 11'E)에서 약 1620미터의 얼음코어가 회수되었다. 물동위원소비, 얼음의 화학조성, 황산염 시그널의 농도변화, 온실기체를 이용한 연령대비 등을 통해 이들 얼음코어의 연령은 잘 정의되어 있으며, 표면으로부터 약 600미터 깊이에 해당하는 층이 지금으로부터 약 만 년 전에 고결된 얼음으로 추정된다(Buiron *et al.*, 2011; Narcisi *et al.*, 2012). 빙하의 연령 대비 오차는 약 일만 오천 년(800미터 깊이 코어) 단위에서 100년으로 보고되어 있다(Buiron *et al.*, 2011; Narcisi *et al.*, 2012). 약 600미터 얼음코어 시료에서 6개의 눈으로 확인되는 테프라 층이 발견되었으며 이들 모두가 남극 북빅토리아랜드 멜버른 프로빈스 화산활동의 결과물로 해석되었다(Narcisi *et al.*, 2012).

본 연구에서는 2012년부터 2016년까지 극지연구소 화산연구그룹에서 확보한 멜버른 프로빈스의 멜버른, 플리아이디, 리트만 일대의 화산암시료의 지구화학 성분자료를 바탕으로 탈로스 돔 빙하 600미터 깊이까지의 얼음코어에 기록된 테프라 층들의 화산유리(volcanic shards) 지구화학 성분과의 대비를 통해 탈로스 돔 얼음코어에 기록된 테프라 층들의 기원화산을 추적하고 최근의 멜버른 프로빈스 화산활동의 분화시기를 논의한다.

플리아이디와 리트만 일대 화산암 시료와 달리, 멜버른 화산의 경우 가장 최근 분화 산물들에 대한 구분이 가능하였기 때문에 멜버른 화산대(Mt. Melbourne Volcanic Field, MMOVF)의 여러 용암류 중 가장 젊은 분화산물인 MMTep과 MMSum 시료들에 대한

지구화학 성분은 별도로 표시하여 논의하였다. 멜버른 프로빈스 화산암 시료들의 주성분원소 조성은 극지연구소의 XRF (X-ray Fluorescence Analysis, PAN analytical Axiosmax)를 이용해 분석하였다. 멜버른 테프라 시료의 주성분원소 조성은 100~250  $\mu\text{m}$  크기의 화산유리입자들을 에폭시 레진에 고정시킨 후 연마편을 제작하여 극지연구소의 EPMA (Electron Probe Micro Analyser, JEOL JXA 8530F)를 이용해 분석하였다. 비정질 화산유리 시료의 EPMA 분석 시 휘발성이 강한 알칼리 원소들(Na, K)이 쉽게 이동하는 성질을 고려하여 분석조건을 빔 크기 10  $\mu\text{m}$ , 전류 10 nA, 전압 15 Kv로 조정하였다. 탈로스 돔 빙하 얼음코어에 기록된 화산유리 시료에 대한 모든 정보는 Narcisi *et al.* (2012)에서 제시한 자료를 이용하였다. 주성분 원소조성은 오차범위를 고려하여 주사전자 현미경을 이용한 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) 분석 자료는 제외하고 EPMA 분석 자료만을 이용하여 비교하였다.

### 3. 결과 및 토의

탈로스 돔 빙하로부터 획득한 600미터 깊이까지의 얼음코어 시료에서 총 15개의 테프라 층들이 발견되었으며(Narcisi *et al.*, 2012), 테프라 함유층들의 깊이, 연령, 테프라의 입자크기, 주성분 원소 분석방법, 추정되는 기원화산 등의 기초 자료를 표 1에 정리하였다. 15개의 테프라 층들 중 눈으로 확인할 정도로 화산유리 농집도가 높고 입자크기가 큰 테프라를 포함한 얼음코어 시료는 TD85, TD87, TD238, TD239, TD388-1 그리고 TD388-2 등 총 여섯 곳의

**Table 2.** Major element composition of tephra shards in Talos Dome ice core related to Antarctic volcanic activity, and representative compositions of tephra from eastern flank of Mt. Melbourne and bulk rock samples collected near summit area.

Sample	n	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TAS classification
TD85	8	65.64	0.50	15.83	5.51	0.18	0.22	1.85	5.43	4.84		Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.36	0.02	0.52	0.2	0.04	0.03	0.05	0.24	0.12		
TD87a	6	61.58	0.43	16.74	6.54	0.28	0.15	1.18	7.92	5.17		Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.37	0.06	0.35	0.15	0.05	0.02	0.05	0.40	0.28		
TD87b	1	57.98	0.58	13.61	12.66	0.68	0.43	2.2	7.25	4.61		Trachyte
TD87b	1	58.39	0.66	14.07	11.82	0.54	0.42	2.27	7.18	4.65		Trachyte
TD87b	1	59.76	0.39	14.69	10.03	0.54	0.25	1.75	8.54	4.05		Trachyte
TD210	10	68.7	0.4	13.2	5.3	0.2	0.2	1.3	6.1	4.8		Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.9	0.2	0.3	0.4	0.1	0.1	0.3	0.8	0.5		
TD238a	4	49.96	3.59	15.74	11.38	0.22	3.56	8.14	4.77	2.64		Phonotephrite
	<i>st. dev.</i>	0.98	0.18	0.09	0.53	0.03	0.21	0.23	0.52	0.19		
TD238b	1	53.08	2.92	16.1	9.78	0.19	2.64	5.87	5.77	3.64		Tephriphonolite
TD238b	1	58.13	1.63	16.99	6.89	0.18	1.69	3.62	5.99	4.86		Trachyandesite
TD238b	1	65.78	0.39	15.67	4.6	0.14	0.21	1.51	6.53	5.16		Trachyte
TD239	18	47.32	3.88	16.18	10.94	0.22	4.11	10.01	4.59	2.77		Tephrite/Basanite
	<i>st. dev.</i>	1.28	0.41	0.61	0.84	0.04	0.72	1.37	0.56	0.57		
TD281	10	64.1	0.4	15.5	5.7	-	0.2	1	7.9	5.2		Trachyte
	<i>st. dev.</i>	1.1	0.3	0.8	1		0.2	0.3	1.4	0.7		
TD388-1	6	51.3	3.14	14.04	13.68	0.29	2.98	6.87	4.35	3.36		Basaltic Trachyandesite
	<i>st. dev.</i>	1.18	0.08	0.23	0.6	0.03	0.32	0.25	0.36	0.32		
TD388-2a	18	56.77	1.75	15.06	11.11	0.30	1.71	4.99	4.9	3.41		Trachyandesite
	<i>st. dev.</i>	0.66	0.11	0.52	0.89	0.04	0.19	0.60	0.46	0.59		
TD388-2b	1	50.14	3.49	16.10	11.09	0.22	3.89	8.43	4.31	2.36		Basaltic Trachyandesite
TD388-2b	1	67.43	0.76	13.54	6.05	0.11	0.42	1.89	4.58	5.21		Trachyte
MMTep004	19	65.58	0.47	15.89	5.30	0.16	0.19	1.85	5.44	5.07	0.04	Trachyte
MMTep005	23	65.60	0.48	15.86	5.35	0.15	0.20	1.86	5.39	5.09	0.03	Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.18	0.03	0.16	0.13	0.02	0.02	0.04	0.17	0.08	0.03	
MMTep007	19	65.57	0.49	15.77	5.48	0.15	0.20	1.81	5.29	5.19	0.04	Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.19	0.03	0.09	0.10	0.02	0.02	0.07	0.14	0.09	0.03	
MMTep008	25	65.71	0.48	15.81	5.43	0.15	0.21	1.86	5.23	5.10	0.03	Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.12	0.03	0.11	0.12	0.02	0.01	0.06	0.13	0.09	0.03	
MMTep020	25	66.75	0.36	15.41	5.15	0.15	0.09	1.79	5.30	4.96	0.03	Trachyte
	<i>st. dev.</i>	0.17	0.02	0.11	0.10	0.02	0.02	0.05	0.19	0.09	0.03	
MMSum01		56.63	1.67	15.50	10.29	0.22	1.79	4.76	5.26	3.34	0.55	Trachyandesite
MMSum02		56.70	1.72	15.52	10.33	0.22	1.73	4.80	5.14	3.25	0.58	Trachyandesite
MMSum03		57.19	1.65	15.48	9.93	0.22	1.72	4.70	5.27	3.26	0.58	Trachyandesite
MMSum04		57.52	1.66	15.34	9.98	0.22	1.69	4.60	5.22	3.30	0.47	Trachyandesite
MMSum05		56.73	1.68	15.47	10.39	0.22	1.72	4.68	5.22	3.35	0.54	Trachyandesite
MMSum06		57.17	1.61	15.53	10.20	0.22	1.60	4.52	5.24	3.39	0.51	Trachyandesite

Data (in weight percent, wt.%) for tephra shards from Talos Dome ice core (Narcisi *et al.*, 2012) and Mt. Melbourne are recalculated to a sum of 100 wt.% and presented as means and one standard deviation of n analyses of different glass shards.

Data for bulk samples from Mt. Melbourne summit are also recalculated to a sum of 100 wt.%.

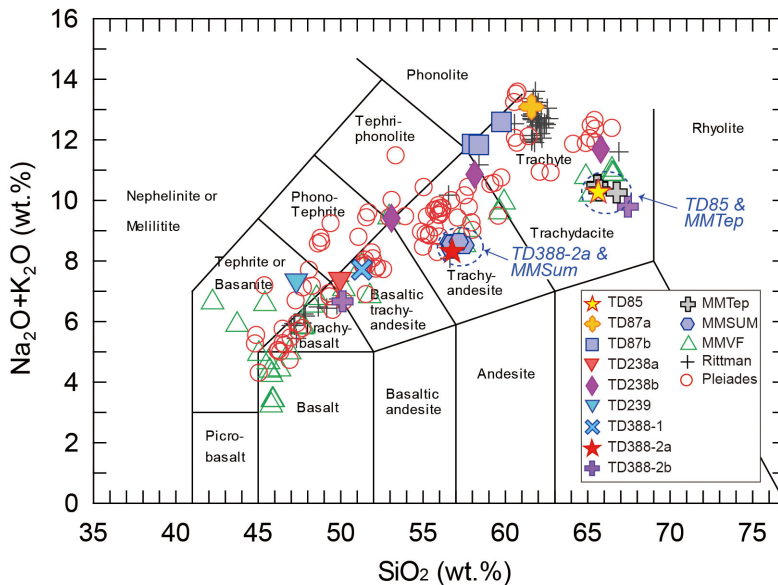
Tas classification according to Le Bas *et al.* (1986).

깊이에서 발견된다. 시료 명칭 중 TD 뒤의 숫자는 얼음코어의 깊이를 나타낸다. TD87, TD238, TD388-2 세 층에서 회수된 화산유리들은 서로 다른 조성범위의 화산유리 군집(populations)들이 혼재되어 산출되는 특징을 보인다. 이 시료들은 조성의 차이를 반영하여 TD87a, TD87b, TD238a, TD238b, TD388-2a, TD388-2b로 각각 달리 분류하였다. Narcisi *et al.* (2012)에 보고된 TD85, TD87a&b, TD238a&b, TD239, TD388-1 그리고 TD388-2a&b 화산유리의 주성분 원소 조성과 함께 MMTep과 MMSum 시료의 주성분 원소 조성을 표 2에 정리하였다. 남극 북빅토리아랜드에 위치하는 멜버른, 리트만 그리고 플리아이디 3개의 활화산 모두 탈로스 돔 빙하 시추지와 약 250 km 거리 이내에 위치한다(그림 1a). 따라서, 이들 화산들은 탈로스 돔 빙하 얼음코어에 산출되는 테프라층들의 가장 유력한 기원화산들로 고려될 수 있다.

Narcisi *et al.* (2012) 연구에서는 빙하코어 87미터 깊이에서 회수된 TD87a와 TD87b 화산재 시료의 기원화산을 플리아이디와 Mt. Berlin 화산으로 추정하고 있을 뿐 나머지 테프라 층들에 대해서는 기원화산들로 유추되는 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산 암체에 대한 충분한 지구화학 자료 확보 부족으로

기원화산을 규정하지는 못하였다. 다만, 테프라 입자의 크기와 형태, 지구화학조성의 경향성을 바탕으로 일부 테프라 시료들이 멜버른 프로빈스 화산활동(멜버른, 리트만, 플리아이디 화산)으로부터 유래되었을 것으로 보고하였다. 본 논문에서는 Narcisi *et al.* (2012)에서 TD87a, TD87b 테프라의 기원화산에 대해서는 각각 플리아이디 화산과 Mt. Berlin 화산으로 해석하였기 때문에 논의에서 제외한다.

탈로스 돔 빙하 얼음코어에서 멜버른 프로빈스 화산활동의 기록들을 찾아내기 위해 얼음코어 화산유리들의 성분과 멜버른, 플리아이디, 리트만 일대 화산암류의 특징적인 주성분 원소 조성을 함께 도시하여 비교하였다(그림 4와 5). 탈로스 돔 얼음코어 테프라 층들의 화산유리 성분을  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  성분 변화도(그림 4, TAS 도표)에 도시하면, 총알칼리 함량( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )은 6.67~13.09 wt.%(weight%) 범위이고  $\text{SiO}_2$  함량은 47.32~67.43 wt.% 범위로서 대부분 알칼리현무암-조면암으로 분화하는 중알칼리 계열 암석에 해당되며, 일부는 바사나이트-포놀라이트의 고알칼리계열 분화 성분에도 도시된다(표 2; 그림 4). 이러한 성분은 멜버른 프로빈스의 가장 젊은 화산들인 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산대 암석들



**Fig. 4.** Total alkali versus silica diagram for visible glass shards (values normalized to 100%) from Talos Dome ice core (Narcisi *et al.*, 2012). The bulk samples from The Pleiades, Mt. Rittman and Mt. Melbourne Volcanic Field (MMVF) volcanoes are plotted together for comparison. Classification scheme and discrimination line between rocks are from Le Bas *et al.* (1986).

의 조성범위와 잘 일치한다.

탈로스 돔 코어의 가장 얇은 깊이, 약 AD 1280년 연령의 얼음코어 층에서 발견되는 TD85 테프라는 입자 크기가 최대 100 μm의 비교적 조립질의 조면암질 조성이다. 그림 4와 5의 TAS 도표와 주성분원소 성분 변화도에서 가장 주목할 만한 특징은 TD85

테프라의 주요 원소함량이 멜버른 화산 동쪽 사면에서 직접 채취한 MMTep의 조성과 매우 유사하다는 점이다. 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산대에서 모두 조면암질 조성의 화산암류가 산출되는 특성을 보이지만 멜버른 화산의 조면암류 성분과 리트만, 플리아이디 화산의 조면암류 성분은 Na<sub>2</sub>O 함량에서

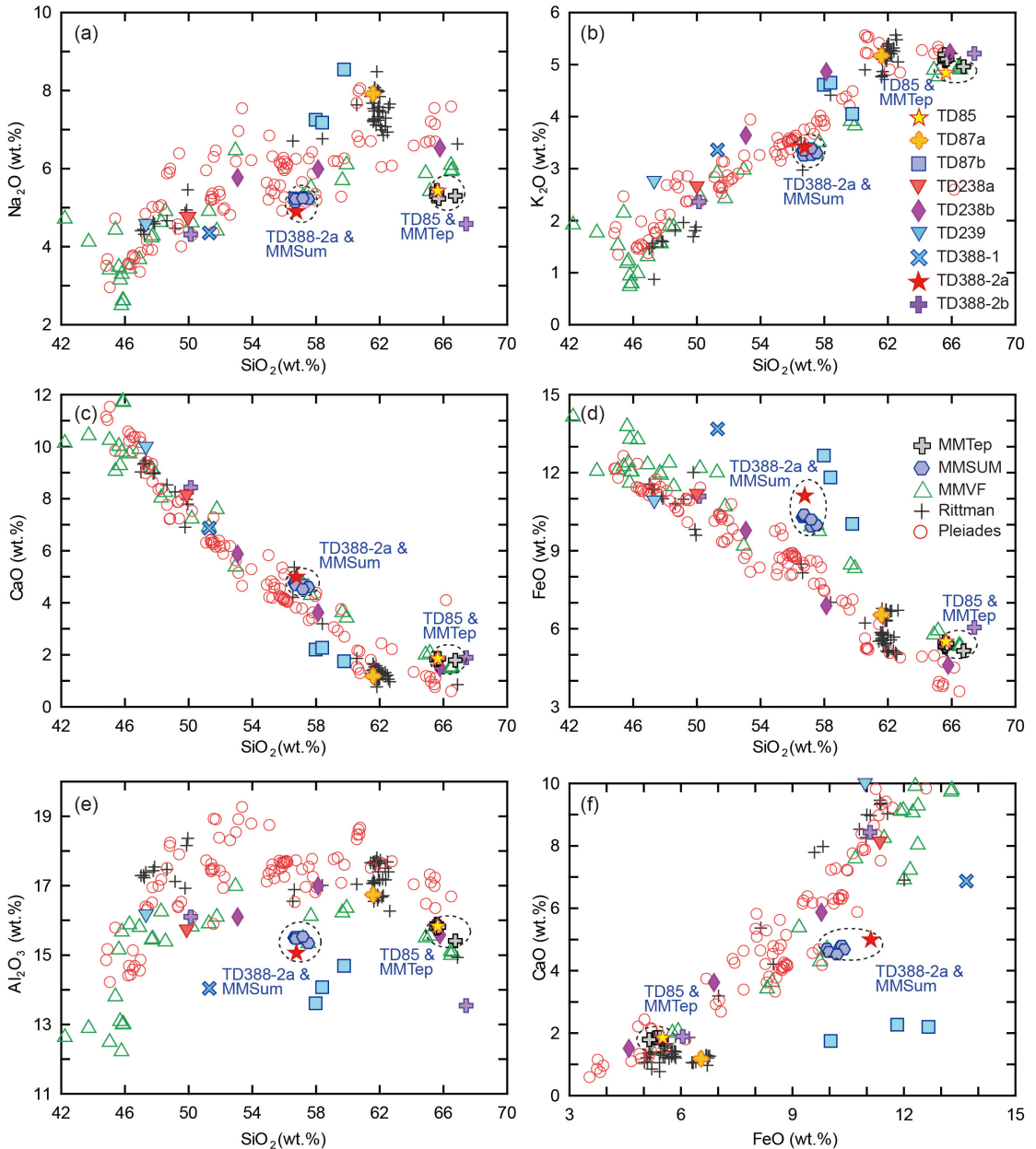


Fig. 5. Diagrams illustrating the geochemical variability and similarity between glass shards from the studied Talos Dome tephras (Narcisi *et al.*, 2012) and the bulk samples from the possible source volcanoes.



서로 뚜렷한 차이를 보인다(그림 5a). TD85 테프라는 입자의 크기( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) 비추어 볼 때 빙하 시추 지역으로부터 가까운 화산에서 유래했을 가능성이 높고 모든 주성분원소들(Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K) 함량이 멜버른 테프라시료와 매우 비슷한 점으로(그림 5, 표 2) 비추어 보아 멜버른 화산의 가장 최근 분화 산물로 추정된다. 따라서, 멜버른 화산의 최후 분화 시기는 TD85 얼음코어의 연령과 같은 지금으로부터 약 737년 전인 AD 1280년으로 추정할 수 있다. 지금까지 멜버른 화산의 최후 분화시기에 대해 여러 논의가 있었으나 멜버른 화산에서 직접 채취한 테프라시료에 대한 지구화학 조성과 연령이 알려진 빙하코어 테프라시료와의 대비를 통해 멜버른 화산 최후 분화시기를 규정한 연구결과는 처음이다.

빙하시추 깊이 238미터에서 회수된 두 종류의 TD238a, TD238b 테프라 화산유리 입자들의 주성분 원소 함량 변화 경향성은  $\text{SiO}_2$  함량은 49.96~65.78 wt.%, 총알칼리 함량( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )은 7.41~11.69 wt.%로 비교적 넓은 조성범위를 나타낸다. TAS 도표와  $\text{SiO}_2$  함량에 대한  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$  함량 변화도(그림 5)에서 플리아이디 화산 시료들과 비슷한 성분 변화 경향성을 보여준다.

TD239 테프라의 원소 함량은 바사나이트 조성의 성분변화를 보여주는데, 멜버른, 리트만, 플리아이디 등 가능한 기원화산 후보지의 바사나이트 조성범위가 매우 비슷하기 때문에 주성분원소 특징만을 가지고 기원화산을 유추하기는 매우 어렵다.

TD388-1 테프라는 현무암질 조면안산암 조성에 해당한다(그림 4). 그러나,  $\text{FeO}$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  원소함량이 멜버른 프로빈스 화산암류와는 다른 경향성을 보여 주므로(그림 5) 멜버른 프로빈스 화산활동으로부터 유래한 테프라로 해석하기는 어렵다. 기원화산을 정확하게 추정하기 위해서는 주성분원소 외에 화산유리 입자의 다른 지구화학 특성, 즉 미량원소 조성 혹은 화산유리내의 결정질 광물이 조성 등의 추가 정보가 필요하다.

388미터 깊이의 또 다른 테프라 층에서 회수한 TD388-2a 화산유리 입자의 주성분 원소 함량은 MMSum 화산암류의 조성과 매우 유사한 특징을 보인다(그림 4와 5; 표 2). TD388-2a 테프라의  $\text{FeO}$  함량이 MMSum 시료보다 약간 높은 경향성을 보이지만, 분석 오차 범위를 고려하면 거의 일치하는 것으로 해석될 수

있다. 멜버른, 리트만, 플리아이디 화산암류 중  $\text{SiO}_2$  함량범위 약 50 wt.%~65 wt.%의 조면안산암질~조면암 조성의 암석들에 대한 주성분 변화 경향성을 살펴보면  $\text{FeO}$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  원소 함량에서 멜버른 화산암류는 리트만과 플리아이디 화산암류와 뚜렷한 차이를 보여준다. 멜버른 화산암류는 리트만과 플리아이디 화산암류에 비해  $\text{FeO}$  함량은 높고(그림 5d와 5f),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량은 낮은(그림 5e) 경향성을 보인다. 따라서 TD388-2a 테프라는 MMSum의 분출로부터 유래된 것으로 해석할 수 있고, MMSum 분출시기는 TD388 얼음코어의 연령인 약 5.2 ka 시기로 유추할 수 있다.

TD388-2 테프라 층에서 회수한 또 다른 조성의 화산유리시료 TD388-2b는 두 개의 입자에 대한 분석 자료가 보고되었으며  $\text{SiO}_2$  함량은 각각 50.14 wt.%와 67.43 wt.% 그리고, 총알칼리 함량( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )은 각각 6.67 wt.%와 9.79 wt.%로 현무암질 조면안산암과 조면암 조성에 해당된다. 조면암 조성에 해당되는 화산유리 입자는 멜버른 화산의 조면암질 화산암류와 주성분원소 변화가 매우 유사하다(그림 4와 5). 그러나 TD388-2b 현무암질 조면안산암 화산유리 입자의 경우, 멜버른, 리트만, 플리아이디 세 화산에서 산출되는 현무암질 조면안산암의 주성분원소 변화 경향성이 차이가 없기 때문에, 이들과 비교를 통해 TD388-2b 현무암질 조면안산암 화산유리 입자의 기원화산을 특정할 수는 없다(그림 4와 5).

#### 4. 결론

탈로스 돔 빙하 600미터 깊이 얼음코어에 기록된 테프라로부터 멜버른 프로빈스 홀로세 화산활동 기록을 검토하였다. 총 6개의 눈으로 확인 가능한 테프라 층(TD85, TD87, TD238, TD239, TD388-1 그리고 TD388-2)으로부터 획득한 화산유리 시료들과 멜버른 프로빈스의 세 활화산인 멜버른, 리트만 그리고 플리아이디 화산일대에서 채집한 화산암류에 대한 주성분원소 비교를 통해 탈로스 돔 테프라의 기원화산을 추적한 결과는 다음과 같다.

- 1) 탈로스 돔 얼음코어의 TD85 테프라와 멜버른 화산 동쪽 사면에 두껍게 퇴적되어 있는 MMTep은 동일한 화산분출의 산물로 해석되며, 따라서 최근까지 논란이 되어온 멜버른 화산의 마

지막 분화는 Lyon (1986)에서 보고한 1862년~1922년보다는 오래된 약 AD 1280년에 일어났던 것으로 추정된다.

- 2) 탈로스돔 얼음코어 238미터에서 회수된 두 종류의 TD238a와 TD238b 테프라는 플리아이디 화산암류의 주성분원소 변화 경향성과 매우 유사한 특징을 보이지만, 확실한 대비를 위해서는 기원화산인 플리아이디 화산암체의 산출암상 및 시기에 대한 자료가 좀 더 보완되어야 한다.
- 3) 탈로스 돔 얼음코어 TD388-2a 테프라와 MMSum의 매우 유사한 주성분원소 변화 경향성은 이들이 동일한 화산분출 사건으로 유래되었음을 지지한다. 이는 멜버른화산 정상에서 약 5.2 Ka 시기에 또 다른 화산분화가 있었음을 암시한다.

## 사 사

이 연구는 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니 다(과제번호 PM17030). 논문의 심사와 유익한 의견을 주신 김기범 박사님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Armstrong, R.L., 1978, K-Ar dating: Late Cenozoic McMurdo Volcanic Group and dry valley glacial history, Victoria Land, Antarctica: New Zealand. *Journal of Geology & Geophysics*, 21, 685-698.
- Armienti, P. and Tripodo, A., 1991, Petrography and chemistry of lavas and comagmatic xenoliths of Mount Rittmann, a volcano discovered during the IV Italian expedition in northern Victoria Land (Antarctica). *Memorie Della Società Geologica Italiana*, 46, 427-451.
- Behrendt, J.C., 1999, Crustal and lithospheric structure of the West Antarctic Rift System from geophysical investigations: A review. *Global and Planet Change*, 23, 25-44.
- Bonaccorso, A., Maione, M., Pertusati, P.C., Privitera, E. and Ricci, C.A., 1991, Fumarolic activity at Mount Rittmann volcano (northern Victoria Land, Antarctica). *Memorie della Società Geologica Italiana*, 46, 453-456.
- Buiron, D., Chappellaz, J., Stenni, B., Frezzotti, M., Baumgartner, M., Capron, E., Landais, A., Lemieux-Dudon, B., Masson-Delmotte, V., Montagnat, M., Parrenin, F. and Schilt, A., 2011, TALDICE-1 age scale of the Talos Dome deep ice core, East Antarctica. *Climate of the Past*, 7, 1-16.
- Dunbar, N.W., McIntosh, W.C. and Esser, R.P., 2008, Physical setting and tephrochronology of the summit caldera ice record at Mount Moulton, West Antarctica. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 796-812, doi: 10.1130/B26140.1.
- Dunbar, N.W., Zielinski, G.A. and Voisins, D.T., 2003, Tephra layers in the Siple Dome and Taylor Dome ice cores, Antarctica: Sources and correlations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B8), 2374, doi:10.1029/2002JB002056.
- Dunbar, N.W., Kurbatov, A., Koffmann, B.G., Kreutz, K.J., 2010, Tephra record of local and distal volcanism in the WAIS Divide ice core. 2010 WAIS Divide Science Meeting, Sept 30-Oct 1, La Jolla, CA.
- Esser, R.P. and Kyle, P.R., 2002, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronology of the McMurdo Volcanic Group at The Pleiades, northern Victoria Land, Antarctica. In *Antarctica at the close of a Millenium* (ed D. Skinner) *Proceedings of the 8th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*. Royal Society of New Zealand Bulletin, 35, Wellington, 415-418.
- Giordano, G., Lucci, F., Phillips, D., Cozzupoli, D. and Runci, V., 2012, Stratigraphy, Geochronology and evolution of the Mt. Melbourne volcanic field (North Victoria Land, Antarctica). *Bulletin of Volcanology*, 74, 1985-2005, doi: 10.1007/s00445-012-0643-8.
- Kyle, P.R., 1982, Colcanic geology of The Pleiades, northern Victoria Land, Antarctica. In *Antarctic Geosciences* (Editor C. Craddock), University of Wisconsin Press, 747-754.
- Kyle, P.R., 1990, Melbourne Volcanic Province, in: LeMasurier, W. and Thomson, J. ed. *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. Antarctic Research Series, 48, American Geophysical Union, 18-145.
- 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. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Le Masurier, W.E. and Thomson, J.W., (eds), 1990, *Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans*. American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 48:512.
- Lyon, G.L., 1986, Stable isotope stratigraphy of ice cores and the age of the last eruption at Mt. Melbourne, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 29(1), 135-138.
- Narcisi, B., Petit, J.R. and Chappellaz, J., 2010a, A 70 ka record of explosive eruptions from the TALDICE ice core (Talos Dome, East Antarctic plateau). *Quaternary Science Reviews*, 25, 844-849, doi: 10.1002/jqs.1427.

- Narcisi, B., Petit, J.R. and Delmonte, B., 2010b, Extended East Antarctic ice-core tephrostratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 29(1-2), 21-27, doi: 10.1016/j.quascirev.2009.07.009.
- Narcisi, B., Petit, J.R., Delmonte, B., Scarchilli, C. and Stenni, B., 2012, A 16,000-yr tephra framework for the Antarctic ice sheet: a contribution from the new Talos Dome core. *Quaternary Science Reviews*, 49, 52-63.
- Narcisi, B., Petit, J.R. and Langone, A., 2017, Last glacial tephra layers in the Talos Dome ice core (peripheral East Antarctic Plateau), with implications for chronostratigraphic correlations and regional volcanic history. *Quaternary Science Reviews*, 165, 111-126, doi: 10.1016/j.quascirev.2017.04.025.
- Narcisi, B., Petit, J.R., Langone, A. and Stenni, B., 2016, A new Eemian record of Antarctic tephra layers retrieved from the Talos Dome ice core (Northern Victoria Land). *Global and planetary Change*, 137, 69-78.
- Nardini, I., Armienti, P., Rocchi, S., Dallai, L. and Harrison, D., 2009, Sr-Nd-Pb-He-O isotope and geochemical constraints on the genesis of Cenozoic magmas from the West Antarctic Rift. *Journal of Petrology*, 50, 1359-1375.
- Nathan, S. and Schulte, F.J., 1967, Recent thermal and volcanic activity on Mount Melbourne, Northern Victoria Land, Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 10(2), 422-430, doi: 10.1080/00288306.1967.10426746.
- Rocholl, A., Stein, M., Molzahan, M., Hart, S.R. and Wörner, G., 1995, Geochemical evolution of rift magmas by progressive tapping of stratified mantle source beneath the Ross Sea rift, Northern Victoria Land, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 131, 207-224.
- Severi, M., Udisti, R., Becagli, S., Stenni, B. and Traversi, R., 2012, Volcanic synchronisation of the EPICA-DC and TALDICE ice cores for the last 42 kyr BP. *Climate of the Past*, 8, 509-517.
- Wilch, T.I., McIntosh, W.C. and Dunbar, N.W., 1999, Late Quaternary volcanic activity in Marie Byrd Land: Potential  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -dated time horizons in West Antarctic ice and marine cores. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10), 1563-1580.
- Wörner, G. and Orsi, G., 1990, Volcanic geology of Edmonson Point, Mt. Melbourne Volcanic Field, North Victoria Land, Antarctica. *Polarforschung*, 60(2), 84-86.
- Wörner, G. and Viereck, L., 1989, The Mt. Melbourne volcanic field (Victoria Land, Antarctica). I. Field observations. *Geologisches Jahrbuch*, E38, 369-393.
- Wörner, G. and Viereck, L., 1990, Mount Melbourne. In: LeMasurier WE and Thomson, J.W., (eds.), 1990, *Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans*. American Geophysical Union, Antarctic Research Series, 48, 72-78.
- Wörner, G., Viereck, L., Hertogen, J. and Niephaus, H., 1989, The Mt. Melbourne Field (Victoria Land, Antarctica) II. Geochemistry and magma genesis. *Geologisches Jahrbuch*, E38, 395-433.

---

Received : July 17, 2017

Revised : August 11, 2017

Accepted : August 12, 2017