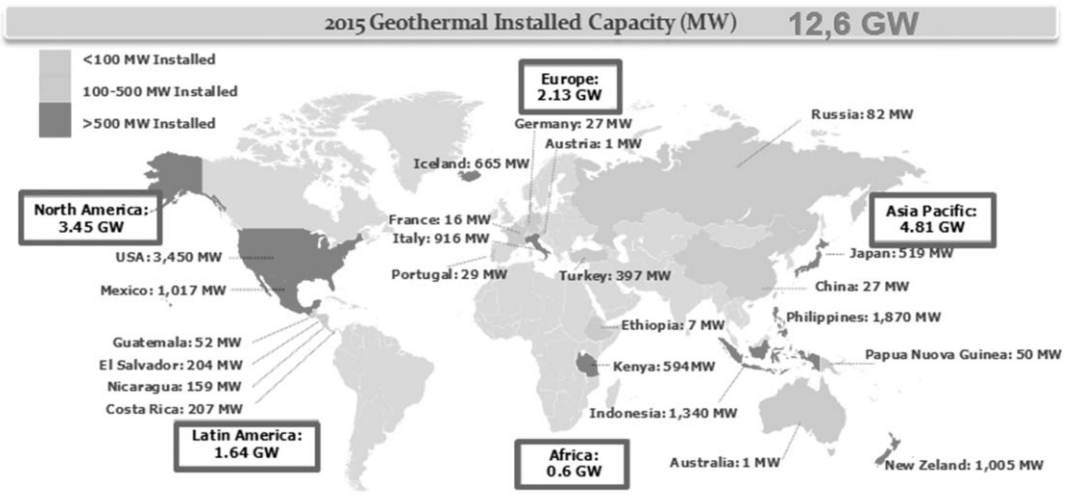
특 집

뉴질랜드 지열발전의 중심
Taupo Volcanic Zone (TVZ)

이 태 종 책임연구원
한국지질자원연구원

2015년 4월 말, 매 5년마다 열리는 World Geothermal Congress (WGC)가 호주 Melbourne 컨벤션센터에서 열렸다. WGC는 국제지열협회(International Geothermal Association; IGA) 주관으로 1995년에 이탈리아 Firenze에서 처음 열린 이후로, 2000년에는 일본의 Kyushu와 Morioka, 2005년에는 터키의 Antalya, 2010년에는 인도네시아의 Bali에서 개최된 바 있다. 이번의 WGC2015는 호주와 뉴질랜드의 공동주최 형태로 조직되어 학술발표는 Melbourne에서 진행하면서 Field Excursion이나 short course 등은 지열발전소가 몰려있는 뉴질랜드의 Taupo 지역을 위주로 진행되었다. 이 소고에서는 WGC 2015의 Field Excursion 장소이면서 뉴질랜드의 지열발전의 중심인 Taupo Volcanic Zone (TVZ)에 대하여 소개하고자 한다.

2015년 WGC에 발표된 전 세계 지열발전 설비



[그림 1] 2015년 전 세계 지열발전 설비용량 (Bertani, 2015)

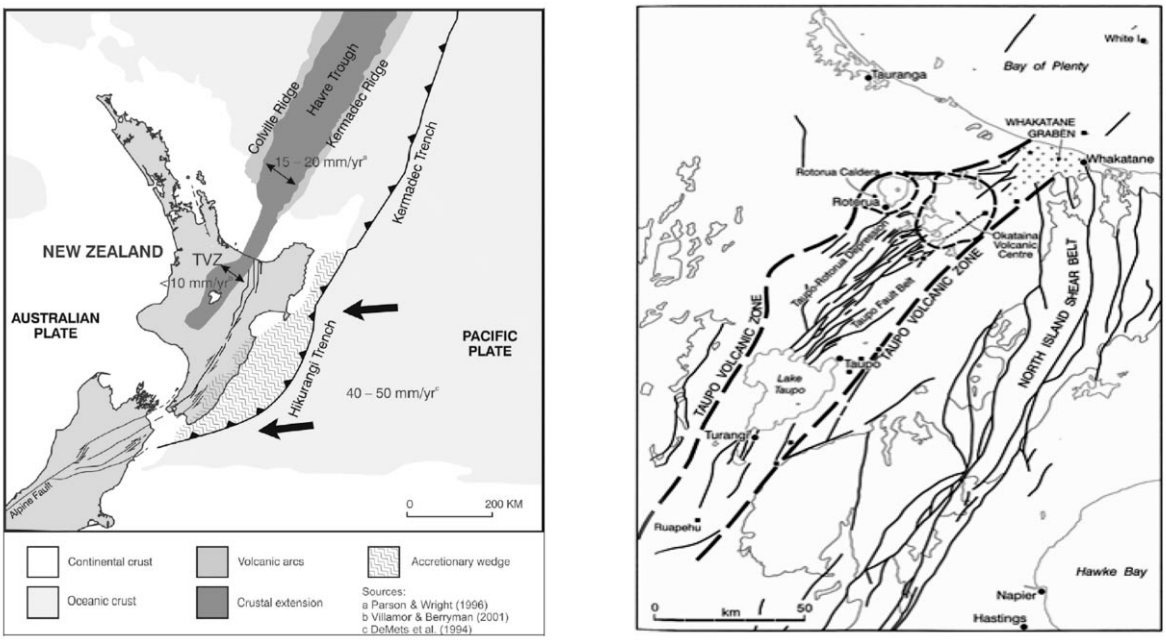
용량은 12.6 GWe로 2010년 10.9 GWe에 비해 약 1.7 GW 증가되어 나타났다(Bertani, 2015). 2010년 기준으로 지열발전 설비용량 1 GW 이상인 국가는 미국, 필리핀과 인도네시아의 3개국이었으나 2015년에는 멕시코와 뉴질랜드가 포함되었다(**그림 1**). 지난 5년간 지열발전 분야에서 케냐(392 MWe)와 터키(306 MWe) 그리고 뉴질랜드(270 MWe)가 눈부신 성장을 보였다(**그림 2**). 이 중 뉴질랜드에서 기간 중 새로이 설치된 지열발전소는 2013년에 Ngatamariki (82 MWe)와 Kawerau (23 MWe), 그리고 2014년에는 Te Mihi (166 MWe) 지열발전소가 가동을 시작했으며, 이들은 모두 뉴질랜드 북섬의 중앙부 즉 Taupo Volcanic Zone (TVZ)내에 위치한다. TVZ는 다수의 칼데라와 단층이 존재하고 이를 통해 화산활동은 물론 심부로부터 지열수의 순환이 지속적으로 이루어지고 있는 화산지역으로 이 지역의 지질 및 지열시스템, 그리고 개발되어 활용되고 있는 지열발전소를 간략히 살펴봄으로써 뉴질랜드의 지열시스템에 대해 이해도를 높일 수 있을 것이다.

[그림 2] 뉴질랜드 지열발전 설비용량 및 생산량 증가 추이 (Bertani, 2015)

1. TVZ의 지질 및 지열시스템

뉴질랜드는 **그림 3**에서 보듯이 태평양판과 호주판의 경계에 위치하며 북동방향으로 펼쳐진 Havre-Trough를 따른 배호분지 혹은 후열도분지의 연장선상에 위치한다. 태평양판이 호주판 밑으로 1년에 약 40-50 mm씩 밀려들어 가면서 형성된 대륙확장 지역으로 북쪽의 해양지각에서는 Havre-Trough 후열도분지가 생성되고 이 분지는 매년 15-20 mm씩 확장이 일어난다. Havre-Trough 내륙 연장선상에서는 지각의 융기(crustal rifting)가 발생하고 융기에 의해 지각이 갈라지고 침강하여 TVZ를 형성한다. 이후 많은 화산활동과 화산 쇄설물들의 퇴적을 반복하여 현재의 TVZ가 형성되었다. TVZ 내에는 많은 단층이 발달해 있는데 (**그림 3**의 오른쪽) 일례로, Paeroa단층은 TVZ(Taupo Volcanic Zones)의 중심에 있는 단층으로 북동-남서 방향으로 발달해 있으며, 최대 단층 scrap의 높이는 480m에 달한다고 한다. 아직도 TVZ는 확장을 계속하고 있으며 평균적으로 연간 10 mm 이내, 북쪽 해안가에서는 연간 15 mm 이내, 남쪽 Taupo 호수 부근에서는 연간 5 mm 이내로 확장되는 것이 관측되고 있다(Wallace et al., 2004). 이러한 확장의 결과로 TVZ와 Havre-Trough내에는 많은 단층과 파쇄대가 발달하게 되며 이러한 단층/파쇄대를 따라 화산활동이 활발하게 이루어지게 된다.

화산 지질학적으로 TVZ내의 화산은 구획이 확실하게 나뉜다. 즉, TVZ의 북쪽과 남쪽 지역에는 제주의 오름과 같은 콘(cone)을 형성하는 안산암(andesite) 계열의 화산이 우세하고, 중앙부는 유문암(rhyolite) 계열의 화산이 우세하다. 유문암 계열의 화산으로 이루어진 중앙 TVZ는 그 면적이 125×60 km 이고 뉴질랜드에서 가장 왕성한 화산활동을 보이는 지역이다. TVZ 화산활동은 약 160만년 전에 시작해서 평균적으로 1000년 당 약 3.8 km^3 의 비율로 분출이 일어난다(Wilson et al., 2009). Wilson 등은 중앙

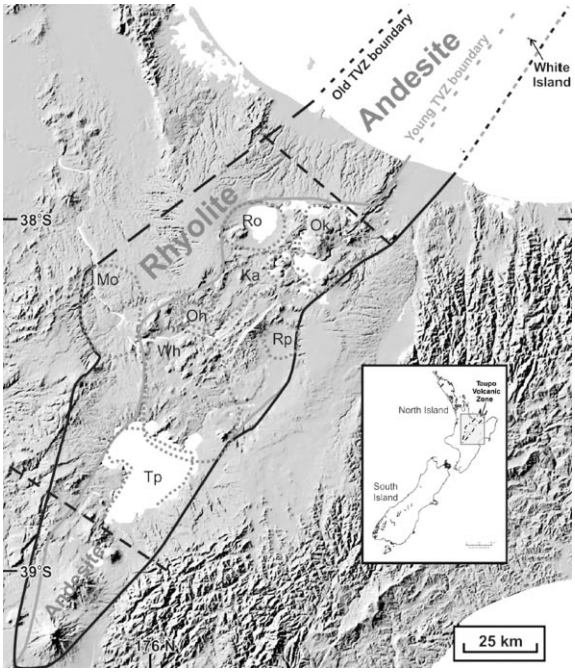


[그림 3] 뉴질랜드 북섬의 지구조운동(좌)과 TVZ내의 단층/파쇄대의 발달 (Nairn, 2002);
TVZ내의 단층/파쇄대는 북동/남서 방향의 방향성이 뚜렷이 보인다.

TVZ 내에서 많은 화산활동에 의해 생성된 칼데라를 특성별로 분류하여 총 8개의 칼데라로 구분했는데 Mangakino (Mo), Whakamaru (Wh), Okataina (Ok), Rotorua (Ro), Ohakuri (Oh), Reporoa (Rp), Taupo (Tp), 그리고 Kapenga (Ka)이다. 이중 Rp, Ro, Oh는 하나의 화산활동, 나머지는 다수의 화산활동에 의해 생성된 칼데라들이다. 최근 6,000년 동안은 Tp와 Ok가 가장 활발한 화산활동을 보였으며 TVZ 내에서 새로이 생성되는 화산물질의 99 vol%를 차지한다고 보고되었다. 가장 최근에 일어난 화산활동은 Okataina (Ok) Volcanic Center 내에 위치한 Tarawera산에서 1886년에 발생하였다.

그림 5는 TVZ 내의 500 m 심도 이내에서의 전기비저항 분포도를 바탕으로 20개 이상의 지열 시스템을 구분한 것으로(Bibby et al., 1995), 대부분은 중앙의 유문암 계열 내에 위치한다. TVZ 내의 지열시스템은 전기비저항 분포도 내에서 따뜻한 색으로 표현되는 저비저항 이상대로 나타나며, 그림 5에는 각각의 전기비저항 이상대에 지열시스템의 이름을 함께 표시하였다. 이들 지열시스템은 평균적으로 약 10 ~ 15 km 간격으로 약 20 km^2의 면적에 걸쳐 분포한다. 이들 지열시스템은 4 km 이상의 심도에 분포하는 마그마 열원에 의해 가열된 200℃이상 고온의 열수가 상승(upflow)하는 지역에 해당되며, 이러한 열수의 순환은 지열 저류층 내의 뜨거운 열수와 그 밖의 지역에 있는 차가운 지하수의 밀도 차이에 의해 이루어진다. 이러한 열수 상승 지역은 단층, 화구, 그리고 칼데라 등 구조적으로 생성된 유체 이동 통로에 해당된다.

그림 5에 표시된 20여개의 지열시스템 중 7개 지열시스템에서는 이미 지열발전소가 건설되어 가동되고 있다. 즉, Tauhara, Wairakei, Mokai, Rotokawa, Ngatamariki, Ohaaki, 그리고 Kawerau가 그것이다. 또한 Kawerau, Mokai, Tauhara, 그리고 Horohoro 지역에서는 화훼단지나 목재 건조 등 농업 혹은 공업용 열원으로



[그림 4] TVZ 화산활동; 북동방향으로 펼쳐진 중앙은 유문암(Rhyolite)계열 화산; 그리고 북동쪽과 남서쪽에서는 안산암(Andesite)계열의 화산활동으로 구분된다. 오른쪽 그림의 붉은 점선은 8개로 구분된 유문암질 화산 칼데라를 각각 표현한 것이다(Wilson, et al., 2009; Houghton et al., 1995).

[그림 5] TVZ 전기비저항 이상도; 고온의 지열 시스템의 위치와 따뜻한 색깔로 표현된 저비저항 이상지역이 잘 대비된다(Bibby et al., 1995).

지열수의 직접이용이 이루어지고 있다.

여기서는 역사적으로 가장 먼저 개발되었고 최근 5년간 가장 많은 개발이 이루어진 Wairakei 지역과 Tauhara 지역의 지열시스템과 지열발전소에 대해 살펴보고자 한다.

2. Wairakei-Tauhara 지열 지대

Wairakei-Tauhara는 TVZ에서 가장 큰 지열시스템으로 **그림 5**에서 Taupo를 중심으로 붉은색으로 나타나는 저비저항 이상대에 해당된다. 현재까지 조사 결과에 의하면 Waikato 강을 경계로 북쪽에 위치하는 Wairakei 지열 시스템은 약 27 km2의 면적을 차지하고, Waikato강 남쪽에는 Tauhara 지열 시스템으로 약 59 km2을 차지한다.

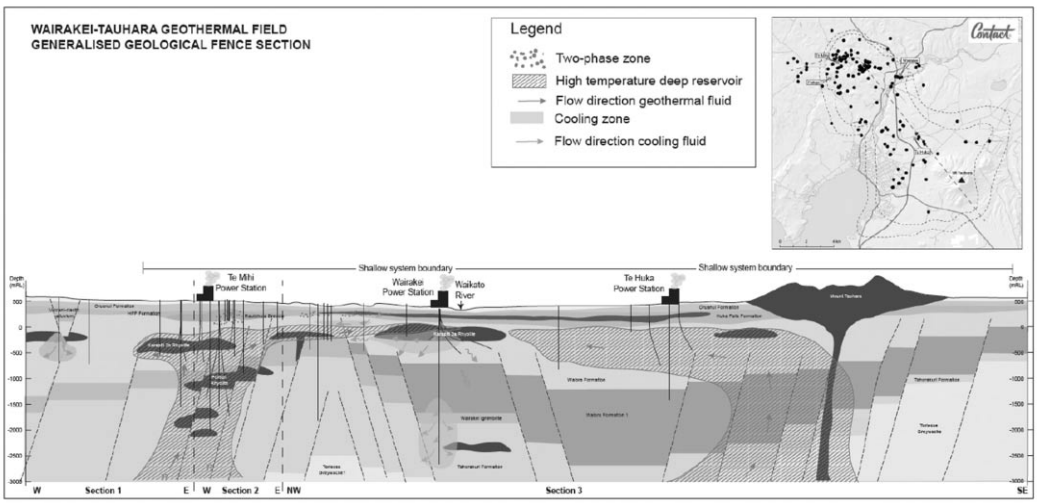
Wairakei 지열발전소는 1958년에 처음 가동을 시작해서 이탈리아의 Larderello 다음으로 세계에서 2번째 지열발전소가 되었으며, 특히 열수 우세형 저류층으로 "Separator"를 가장 먼저 사용한 곳으로 유명하다. 지열발전을 시작한지 처음 20년간은 생산에 따른 저류층 압력이 지속적으로 감소해서 25 bar까지 감소했으나, 이후 자연적인 재충전과 1990년대 중반부터 실시한 재주입의 영향으로 저류층 압력이 안정화되었다. 이 지역의 지열발전은 Contact Energy사가 담당하고 있는데 2013년까지 쉬지 않고 시추를 통한 지열개발이 이루어져 이 지역에서만 표 1과 같이 총 397 MWe 의 지열발전소가 가동 중에 있다. 또한 Tauhara 지역에서 지열자원 조사를 수행한 결과 250 MWe 의 추가적인 지열개발(TauharaⅡ)을 허가받은 상태로 향후 뉴질랜드

<표 1> Wairakei 및 Tauhara 지역 지열발전소 현황

Power Station	Type	Commissioned	Gross Output	Location
Te Mihi	Flash steam	2014	166 MWe	Wairakei
Wairakei	Flash steam	1958	132 MWe	Wairakei
	Binary	2005	16 MWe	Wairakei
Poihipi	Flash steam	1997	55 MWe	Wairakei
Te Huka	Binary	2010	28 MWe	Tauhara

에서 가장 활발하게 지열개발이 이루어질 지역임에 틀림없다.

그림 6은 Wairakei-Tauhara 지열대의 개념모델과 지열발전소의 위치를 표시한 것으로 key-map에 표시된 바와 같이 북서-남동 단면이다. 북서쪽에 위치한 Wairakei 지열지대에 Te Mihi 지열발전소에서 출발해서 남동쪽으로 약 5 km 떨어져 Wairakei 지열발전소가 위치한다. 이후 계속 남동쪽으로 이동하면 약 6 km 떨어져 Te Huka 지열발전소가 위치한다. 이후 남동쪽으로는 유문암으로 구성된 Tauhara산이 위치한다. Wairakei 지열발전소는 비교적 오래전에 개발되었고 또한 그림 6에서 볼 수 있듯이 뜨거운 열수가 존재하는 지열 저류층이 비교적 천부에 존재하는 관계로 시추공들이 1,000 m이내로 얕다. 그러나 최근에 개발된 Te Mihi와 Te Huka 지열발전소의 시추공들은 2,000 m 이상의 장심도 시추공도 존재한다. 특히 Te Mihi의 경우 시추공이 매우 많은 것을 볼 수 있는데, 특징적으로 Wairakei 지열대의 3개의 지열발전소(Te Mihi, Wairakei, 그리고 Poihipi)는 서로 파이프라인으로 연결되어 Te Mihi에서 생산된 지열수를 필요에 따라 Wairakei 혹은 Poihipi 지열발전소로 보내 전기를 생산하기도 한다고 한다. 이를 통해 특정 발전소의 지열정이나 발전설비의 유지/보수 기간에도 지속적으로 지열발전이 가능하다는 설명이다. 이를 위해서 파이프라인이 Te Mihi로부터 Wairakei까지 약 5 킬로미터, Poihipi 까지 약 2 km 정도 연결되어 있고 매 300미터마다 코일 구조를 해두었는데 이는 파이프라인이 최대온도



[그림 6] Wairakei-Tauhara 지열발전소 및 지열시스템 (Rae et al., 2015)

[그림 7] Te Mihi와 Wairakei 지열발전소를 연결하는 파이프라인.

에서 5 km에 15미터나 늘어나기 때문이라고 한다(**그림 7**).

그림 6에는 지열발전에 활용된 지열수를 다시 재주입하는 위치도 나타나 있으며, Te Mihi 지열발전소의 경우 지표로부터 약 500 m~1,000 m 하부에 주입하고, Wairakei의 경우는 500~1,000 m 심도의 상부 저류층 뿐 아니라 2,000 m 이상 심도의 하부 저류층에도 재주입을 하는 것을 볼 수 있다.

이러한 재주입에 의해 발생하는 미소진동에 대한 연구 중 흥미로운 것은 지열발전에 활용한 차가운 물을 상부 저류층 혹은 하부 저류층에 재주입하게 됨으로써 재주입되는 관정 부근에서는 저류층이 급속히 냉각됨에 따라 미소진동이 발생한다는 "냉각에 의한 미소진동"에 대한 연구가 GNS Science를 중심으로 연구되고 있다. 또한, Wairakei 지열발전소에서 사용하는 냉각수는 발전소 바로 옆을 흐르는 Waikato 강의 물을 끓어와 냉각수로 활용하고 이를 다시 하천으로 방류하게 되는 시스템인데, 하천에서 무한히 공급되는 낮은 온도의 하천수를 냉각수로 이용하므로 여름철에도 발전량의 저하가 거의 없고, 공기냉각 방식에 비해 월등히 그 효율이 높다. 또한 냉각에 활용된 물에는 황화물 등이 포함되어 있는데, Wairakei 지열발전소에서는 이 물을 하천으로 방류하기 전에 미생물을 이용한 냉각수의 정화 방법을 개발하여 활용하고 있다. 미생물 반응 튜브(bioreactor tube)라 이름 붙여진 이 설비를 이용하여 95% 이상의 황화물을 제거한 후 Waikato강으로 흘러 보내게 된다. 이러한 정화

[그림 8] Wairakei 지열발전소에 설치된 냉각수 정화를 위한 bioreactor tube (Carey et al., 2015).

설비는 TVZ 화산지역의 하천에 상류로부터 하류로 가면서 물의 온도가 달라짐에 따라 서식하는 박테리아가 달라지고 이들 박테리아를 연구함으로써 나온 결과로 우리나라에서도 심부 시추공내 존재하는 미생물에 대한 연구가 막 시작되는 단계에서 매우 흥미로운 결과이다.

3. 맺음말

이상에서 뉴질랜드 북섬의 지열발전의 중심인 Taupo Volcanic Zone (TVZ)과 TVZ 내의 여러 지열지대 중 뉴질랜드 지열발전소의 상징격인 Wairaki 지열발전소를 중심으로 한 Wairakei-Tauhara 지열지대에 대해 간략히 살펴보았다. 지열발전에 의해 뉴질랜드는 전체 전기에너지의 16%를 지열발전에서 공급하고 있다. 또한 현재 지열을 포함하여 수력, 풍력 등의 신재생에너지에서 전체 필요한 전기에너지의 75%를 조달하고 있고 향후 2025년까지 90% 달성을 목표로 하고 있다. 앞에서 살펴보았듯이 Wairakei-Tauhara 지역에서 이미 250 MW이상의 지열발전 잠재량이 확인되어 개발을 기다리고 있고, TVZ 내의 8개의 칼데라, 약 20개에 달하는 지열시스템 또한 조사 및 개발을 기다리고 있으므로 향후 뉴질랜드에서의 지열에너지의 개발 전망은 매우 밝다고 생각된다. 가까운 시일 내에 우리나라의 연구소, 대학, 기업들이 TVZ 내에 위치한 연구기관인 GNS Science 혹은 TVZ 지열발전을 총괄하는 Contact Energy사와 함께 다양한 연구와 지열개발을 함께 할 수 있기를 기대하며 이 보고서가 약간의 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

1. Bertani, R., 2015, Geothermal power generation in the world ? 2010-2015 update report, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
2. Bibby, H.M., Caldwell, T.G., Davey, F.J., and Webb, T.H., 1995, Geophysical evidence on the structure of the Taupo Volcanic Zone and its hydrothermal circulation, J. of Volcanology and Geothermal Reserach, Vol. 68, pp. 29-58.
3. Carey, B., Dunstall, M., McClintock, S., White, B., Bignall, G., Luketina, K., Robson, B., Zarrouk, S., and Seward, A., 2015, 2015 New Zealand Country Update, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
4. Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., McWilliams, M.O., Lanphere, M.A., Weaver, S.D., Briggs, R.M., Pringle, M.S., 1995, Chronology and dynamics of a large silicic magmatic system: Central Taupo Volcanic Zone, NZ, Geology, Vol. 23, pp. 13-16.
5. Nairn, I.A., 2002, Geology of the Okataina Volcanic Centre, 1:50 000, Institute of Geological and Nuclear Sciences Geological Map 25.
6. Rae, A.J., Bignall, G., Scott, B.J., Kilgour, G., Rosenberg, M., and Sepulveda, F., 2015, WGC 2015 Post Congress Field Trip ? Powerful Landscape, GNS science and New Zealand Geothermal Association, 78p.
7. Wilson, C.J.N., Gravley, D.M., Leonard, G.S., Rowland, J.V., 2009, Volcanism in the central Taupo Volcanic Zone, NZ: tempo, styles and controls, In: Thordarson, T., Self, S., Larsen, G., Rowland, S.K., and Hoskuldsson, A., (eds) Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker. Special Publications of IAVCEI, Vol. 2, pp. 225-247.