



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2014년 8월
박사학위 논문

무등산지역의 화성암류에 대한
암석화학적 연구

조선대학교 대학원

지구과학과

강 대 연

무등산지역의 화성암류에 대한
암석화학적 연구

Petrochemical Studies on the Igneous Rocks at Mt.
Mudeung in the Gwangju, Korea

2014년 8월 25일

조선대학교 대학원

지구과학과

강 대 연

무등산지역의 화성암류에 대한
암석화학적 연구

지도교수 신인현

이 논문을 이학박사학위 신청 논문으로 제출함

2014년 4월

조선대학교 대학원

지구과학과

강대연의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	안건상
위원	조선대학교	교수	박천영
위원	한국기초과학지원 연구원	책임기술원	정연중
위원	조선대학교	교수	류찬수
위원	조선대학교	교수	신인현

2014년 6월

조선대학교 대학원

차 례

List of Tables	i
List of Figures	ii
ABSTRACT	iii
제1장 서언	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구 방법	3
제2장 연구지역의 지질	6
제1절 지질 개요	6
제2절 암석기재	9
제3장 암석 화학	22
제1절 주성분 원소	22
제2절 미량성분 원소	34
제3절 희토류 원소	55
제4장 화성암류의 지질연대	61
제1절 동위원소 분석방법	61
제2절 Rb-Sr법의 결과와 해석	62
제5장 종합적 고찰	67
제1절 화성암류의 성인	67
제2절 미문상 화강암의 기원	79

제3절 지구조운동 및 무등산 지역의 형성사	81
제6장 결론	86
참고문헌	88
APPENDIX	
감사의 글	

List of Tables

Table	Page
1-1. The sample of analyzing on the Igneous Rocks of Mt. Mudeung area.	4
1-2. The sampling site on the Igneous Rocks of Mt. Mudeung area.	5
2-1. Geological sequence of Mt. Mudeung area.	8
3-1. Chemical compositions of major elements(wt. %) of the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	24
3-2. Contents of the trace elements in the igneous rocks in the Mt. Mudeung area.	35
3-3. The comparison of trace element abundances between the study area, average for th Earth crust, the three common rocks and the average of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in the southern Korea.	38
3-4. Contents of the Rare Earth Elements(ppm) in the Igneous Rocks from the Mt. Mudeung area.	57
3-5. Range of REE contents in acidic and intermediate rocks	58
4-1. Rb-Sr isotopic data from the whole rocks in the Mt. Mudeung area.	63
4-2. The comparison of retention temperatures of the whole rock and minerals by the Rb-Sr and K-Ar methods.	63

List of Figures

Figure	Page
1-1. The location of Mt. Mudeung area.	2
2-1. Geological and rock sampling site map of Mt. Mudeung area.	7
2-2. Outcrop and amygdaloidal structure of Hwasun andesite at the Jeungsimsa valley.	10
2-3. Vertical joint of the Dogok rhyolite at the Seoinbong.	12
2-4. A rhyolite cave near the majibbong.	12
2-5. Photo of outcrop and micro photograph of Dacite at Mt. Mudeung area.	13
2-6. Lapilli on lamination and vertical joint of the Mudeungsan quartz andesite at the Jangbulje.	14
2-7. Fiamme in lamination of the Mudeungsan quartz andesite.	15
2-8. Flow structure of lamination.	15
2-9. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Wonhyo temple.	16
2-10. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Cheonggokri.	17
2-11. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Soomanri(coin).	18
2-12. Gnamma of micrographic granite at the Eusangbong(Peak).	19
2-13. A granite tor at the Tugubong(Peak).	19
2-14. A granite cave at the Yunpilbong(Peak).	19
2-15. Colonnades of the Seoseokdae(a) and Ipseokdae(b).	20
2-16. The Block stream of Mt. Mudeung.	20
2-17. Colonnades of the Seoseokdae and block stream.	21
3-1. Location of the samples that were used in the chemical analysis of the Mt.Mudeung area.	23
3-2. Harker diagram of major elements(wt%) for igneous rocks in the Mt Mudeung area.	26
3-3. The relations hips between SiO ₂ (wt.%) and (a) Na ₂ O/K ₂ O (b) alkali and in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	31

3-4. The relations hips between CaO content and (a) total alkali, (b) MgO in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	32
3-5. Triangular diagram of AFM ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area(after Brown et al., 1984).	33
3-6. Variation diagrams between SiO_2 and various trace elements in the igneous rocks Mt. Mudeung area.	39
3-7. The relationship Between Sr and Rb in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	45
3-8. The relationship Between CaO and Sr in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	46
3-9. The relationship Between K_2O and (a) Ba, (b) Rb, (c) Sr in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	47
3-10. Chondrite normalized rare earth elements(REE) patterns of igneous rocks in the Mt. Mudeung area.	59
3-11. REE variation diagram. Total REE (ppm) versus La/Yb ratio showing systematic trend on total REE from Cretaceous volcanic rocks in Mt. Mudeung area.	60
4-1. Isochron diagram for the whole rocks of the micrographic granites in the Mt. Mudeung area..	64
4-2. Isochron diagram for the whole rocks of the dacite in the Mt. Mudeung area.	65
5-1. Triangular diagram of molar A ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$)-C (CaO)-F ($\text{FeO} + \text{MgO}$) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	67
5-2. The relationship between Na_2O and K_2O in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	68
5-3. The relationship between total alkali and SiO_2 in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	70
5-4. Triangular diagram of NCK ($\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$) (wt.%) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	71
5-5. $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ vs. SiO_2 in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.	72

5-6. Triangular diagram of Rb-Ba-Sr system in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.73

5-7. $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 (wt.%) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.76

5-8. SiO_2 vs. Rb, and Y in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.77

5-9. A Schematic presentation of the model for granitic magmatism in the Yeongdong - Gwangju depression.84

ABSTRACT

Petrochemical Studies on the Igneous Rocks at Mt. Mudeung in the Gwangju, Korea

Kang Dae Ryun

Advisor : Prof. Shin In Hyun

Department of Earth Science

Graduate School of Chosun University

Petrochemical studies on the Igneous rocks at Mt. Mudeung area, the south-west of the Yeongdong-Gwangju depression, are performed to investigate the petrogenesis of the igneous rocks, differentiation processes and igneous activities of the granitic magma, and the geotectonic environments related to plate motions. X-ray fluorescence analyses for major, trace and rare earth element contents, and mass spectroscopy for Rb-Sr age dating and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial ratio were adopted in the study. The lithology of the study area consists of Pre-cambrian granite gneiss, Triassic hornblende-biotite granodiorite, Jurassic quartz diorite and Cretaceous igneous rocks. The Cretaceous igneous rocks consist of volcanic rocks (Hwasun andesite, Mudeungsan dacite and Dogok rhyolite) and granitic rocks (micrographic granite and quartz porphyry).

Major elements of the Cretaceous igneous rocks represent calc-alkaline rocks series and correspond to a series of differentiated products from cogenetic magma. Igneous activity of Mt. Mudeung area started from volcanic activity, and continued to intrusive activity at end of the Cretaceous. In chondrite normalized REE pattern, most of Igneous rocks of Mt. Mudeung area show similar pattern of Eu(-) anomaly. This is a characteristic feature of granite in continental margin where tectonic movement occurred. Variation diagrams of

total REE vs. La/Yb and V vs. SiO₂ indicate differentiation and magnetite fractionation sequential trend of Hwasun andesite→Mudeung-san dacite→Quartz porphyry→Micrographic granite.

Igneous rocks in Mt. Mudeung area was the magma formed within the mantle differentiated from I-type and syn-COLG type. and it was progressively differentiate from crystallization of magma.

The dacite eruption in the late Cretaceous(80.6±1.4 Ma, by Rb/Sr whole rock age dating, Sr initial ratio = 0.709280±0.000010), and the micrographic granite intruded into a shallow depth of the crust in the late Cretaceous(76.8±3.6 Ma, by Rb/Sr whole rock age dating, Sr initial ratio = 0.71067±0.00023) in a volcanic arc. The Igneous rocks in the Mt. Mudeung area is distributed in the shape of a cauldron. The cauldron was formed in by the collapse of the volcanic vent as a result of an andesitic volcanic activity, followed by the extrusion of a large amount of rhyolitic ash. This was followed by the ring-fracture volcanism of renewed magma. Finally, a central pluton intruded and emplaced the resurgent cauldron.

Key words: Yeongdong-Gwangju depression, Mt. Mudeung area, differentiation, Kula plate, Cauldron, Rb-Sr Whole rock age, Sr initial ratio, Micrographic granite,

제1장 서언

제1절 연구 배경 및 목적

중생대 한반도에서 판구조운동은 Kula판과 태평양판이 유라시아판 밑으로 들어가면서 조산운동과 그에 수반되는 마그마 작용을 일으켰다. 이들 조산운동으로는 송림변동, 대보조산운동, 불국사변동을 들 수 있는데(김옥준, 1971, 1975), 송림변동은 트라이아스기에서 유라기 초기에 주로 한반도의 북부 지역에, 대보운동은 유라기에 중부지역에, 불국사변동은 백악기에서 제3기초에 황강리와 속리산지역을 제외한 남부와 남동부지역에서 각각 화강암을 수반하며 일어났다(김옥준, 1971; Lee, 1974). 이들 중생대 화강암은 한반도에 분포한 화강암의 80% 이상을 차지하는데, 남한지역에서는 트라이아스기에서 유라기에 생성된 엽리상화강암과 유라기의 대보화강암 그리고 불국사화강암의 세 그룹으로 구분된다. 최근의 Rb/Sr 연령 측정에 의하면 일부 대보화강암은 트라이아스기의 연대를 지시한다(주승환, 1986; 김용준, 1991; 김용준 등, 1993; Jwa, 1990). Jin (1980, 1985), 이상만과 이상현(1982)에 의하면 대보화강암과 불국사화강암의 근원물질은 아주 다르다. 대보화강암은 지각물질의 부분용융에 의한 마그마로부터 만들어졌고, 불국사화강암은 하부지각 또는 상부 맨틀 물질로 만들어진 마그마에 의해 생성되었다.

한반도에서 불국사화강암은 천소(shallow-depth)에 관입 정지한 특징을 보이며, 중요한 광상들의 광화작용과도 밀접한 관계를 갖고 있다(Lee, 1991). 일반적으로 불국사화강암이라고 불리어지는 화강암류는 연대순으로 진동화강암, 불국사화강암(좁은 의미) 및 마산암으로 나누어지는데(Lee, 1979), Koto(1909)에 의해 정의된 마산암은 세 암체 중에서 가장 높게 분화된 특징을 보인다. 그러나 불국사화강암과 마산암 사이의 기원 관계는 아직 분명하지 않다. Lee(1979)는 마산암을 화강암질 암석의 후기 관입에 의한 것이라고 주장했으며, 진명식(1985), Jin(1988)과 Lee(1991)는 화강암질 암석의 암석화학적 연구를 통해 마산암은 불국사화강암의 결정분화의 산물이라고 주장했다.

무등산지역은 한반도 남서부의 광주광역시 중심에서 동쪽으로 약 10km 지점에 위치하고 있으며, 경위도상으로는 $126^{\circ}56' E \sim 127^{\circ}03' E$, $35^{\circ}04' \sim 35^{\circ}11' N$ 에 걸쳐 있다. 무등산은 소백산맥에 속하며, 정상(해발고도 1,187m)에는 천왕봉, 지왕봉,

인왕봉 등이 돌출되어 있고 천연기념물로 지정된 서석대와 입석대, 광석대 등의 주상절리대가 있으며, 이들의 분포 면적은 여의도 면적(8.4km²)보다 넓은 11km² 이상이다(전남대학교 공룡연구센터, 2013). 또한 덕산, 지공너덜 등이 분포하며, 전체적으로는 완만한 지형으로 되어있다.



Fig. 1-1. The location of Mt. Mudeung area.

한편, 무등산 지역은 선캄브리아기부터 백악기에 이르는 다양한 화성암류로 구성되어 있으며, 무등산 용암류가 넓게 분포한 상태에서 불국사 화강암류가 관입되어 있다(김용준 등, 2002). 기존 연구는 동북 지질도폭(김봉균과 박병권, 1966)과 광주 지질도폭(김규봉 등, 1990), 그리고 김용준 등(2002)의 조사가 수행되었고, 백악기 퇴적층과 공룡화석에 관한 연구도 수행되었다(Huh et al., 2003, 2006). 또한 지형과 경관에 관한 연구도 다양하게 이루어지고 있으며(Ahn, 2010, 2013; Oh, 2012), 2013년에는 국가 지질공원 등재를 위한 연구가 이루어졌다(Huh et al., 2013). 연구 지역은 한반도 서남부 중생대 화성활동사를 학습할 수 있는 적절한 곳임에도 불구하고, 연대측정은 아직까지 거의 이루어지지 않았다.

이 연구의 목적은 무등산 지역의 화성암류에 대한 암석 광물의 화학적 특징과 생성 연대를 파악하여 무등산지역의 화성활동에 따른 지각변동을 지체구조론적 입장에서 확인하고자 하는데 있다.

제2절 연구 방법

본 연구는 4년 동안에 걸쳐 야외지질조사와 실내연구를 병행하여 실시하였다. 야외조사는 10 여 차례에 걸쳐 20 여 일 동안 정밀 지질조사를 실시하여 50 여개의 시료를 채취하였다. 화학분석은 신선한 암석표품을 대상으로 15개 시료에 대한 주성분원소, 18개 시료에 대한 미량성분원소와 희토류원소를 분석하였으며 미문상화강암과 석영안산암에 대한 연대측정을 의뢰하였다. 채취된 시료는 Jaw crusher와 텅스텐 카바이드 링밀을 이용하여 파·분쇄하였다.

1. 주성분 원소

본역 화성암류의 주성분 원소를 파악하기 위해 미문상화강암 7개, 석영반암 2개, 석영안산암 5개, 안산암 2개 총 15개의 시료를 선정하여 조선대학교 공동실험실습관 X-선 분석실험실에 의뢰하여 X-선 형광분석기(RIX-2000)로 시료의 전암 조성을 분석하였다. 시료는 세립 분말을 만들어 암종별로 대표적인 시료 총 15개의 화학분석을 의뢰하였다.

2. 미량성분 원소, 희토류 원소

미량성분 원소 및 희토류 원소의 파악을 위해 미문상화강암 8개, 석영반암 2개, 석영안산암 5개, 안산암 3개 총 18개의 시료를 선정하여 한국기초과학지원연구원 오창센터환경과학연구부에 의뢰 하였으며, 원소 분석을 위해 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer; 유도결합 플라즈마질량분석기)를 사용하여 의뢰한 총 19종의 시료 중 18종의 시료를 분석하여 미량원소 및 희토류 원소의 조성을 분석하였다. 시료의 준비과정은 XRF분석 시료의 준비과정과 동일하게 하였다.

3. 동위원소질량분석

연대측정은 본 연구의 주 암종인 무등산 미문상화강암 8개와 석영안산암 6개 총 14종의 시료를 선정하여 한국기초과학지원연구원 오창센터 환경과학연구부에 의뢰하여 TIMS(Thermal Ionization Mass Spectrometer; 열이온화질량분석기)로 Rb/Sr의 양을 측정하여 Isochrone으로 연대를 계산하였다. 시료의 준비과정은 XRF분석 시료의 준비과정과 동일하게 하였다.

Table 1-1. The sample of analyzing on the Igneous Rocks of Mt. Mudeung area.

	Samples	Major Element	Trace Element	Rb-Sr Age
1	Kmgr-1	○	○	○
2	Kmgr-2		○	○
3	Kmgr-3	○	○	○
4	Kmgr-4	○	○	○
5	Kmgr-5	○	○	○
6	Kmgr-6		○	○
7	Kmgr-7	○	○	○
8	Kmgr-8	○	○	○
9	Qp-1	○	○	
10	Qp-2	○	○	
11	Da-1	○	○	○
12	Da-2		○	○
13	Da-3	○		○
14	Da-4	○	○	○
15	Da-5	○	○	○
16	Da-6	○	○	○
17	An-1	○	○	
18	An-2	○	○	
19	An-3		○	

Table 1-2. The sampling site on the Igneous Rocks of Mt. Mudeung area.

	Sample number	Name of the rock	Location(GPS)
1	Kmgr-1	Micrographic Granite	326m, N35°05.677' E126°59.909'
2	Kmgr-2	Micrographic Granite	353m, N35°05.924' E127°00.143'
3	Kmgr-3	Micrographic Granite	309m, N35°09.499' E127°01.200'
4	Kmgr-4	Micrographic Granite	243m, N35°09.814' E127°01.814'
5	Kmgr-5	Micrographic Granite	333m, N35°08.942' E126°59.303'
6	Kmgr-6	Micrographic Granite	334m, N35°08.801' E126°59.355'
7	Kmgr-7	Micrographic Granite	386m, N35°08.588' E126°59.494'
8	Kmgr-8	Micrographic Granite	459m, N35°08.346' E126°59.584'
9	Qp-1	Quartz Porphyry	466m, N35°08.450' E126°58.811'
10	Qp-2	Quartz Porphyry	463m, N35°08.361' E126°58.724'
11	Da-1	Dacite	314m, N35°09.462' E126°58.578'
12	Da-2	Dacite	410m, N35°09.380' E126°58.832'
13	Da-3	Dacite	761m, N35°07.927' E126°59.081'
14	Da-4	Dacite	832m, N35°07.751' E126°59.238'
15	Da-5	Dacite	855m, N35°07.433' E126°59.717'
16	Da-6	Dacite	1030m, N35°07.286' E127°00.061'
17	An-1	Andesite	255m, N35°09.465' E126°56.807'
18	An-2	Andesite	292m, N35°07.612' E126°58.299'
19	An-3	Andesite	552m, N35°07.431' E126°58.979'

제2장 연구지역의 지질

제1절 지질 개요

본 연구 지역은 선캄브리아기의 편마암체를 기저로 이를 부정합으로 덮는 변성 퇴적암류의 평안계층과 이들을 관입하는 트라이아스기 화강암 그리고 상기의 모든 암층을 관입 또는 부정합 관계로 덮는 백악기화성쇄설암-퇴적암-화강암류로 이루어져있다(Table. 2-1).

편마암 복합체는 정편마암류와 준편마암류로 구분된다. 정편마암류는 화강 편마암과 반상변정질화강편마암으로 구성되며 이들의 형성 시기는 이웃한 소백산 편마암 복합체의 동일 암상에서 미루어볼 때 원생대초기~중기(주승환, 1986; 김용준, 1988; 김용준 등, 1995)에 해당하며, 준편마암도 암층 사이의 상호 관계로 보아 이들 정편마암류보다 얼마간 더 고기에 속할 것으로 추정된다(김용준 등, 2002).

변성 평안계는 연구지역 동남부에 소규모로 분포하며 장동층에 의하여 부정합의 관계로 덮여 있다. 구성암은 사암, 셰일, 운모편암, 역질사암 등으로 구성되며 탄층이 협재되어 있어 곳곳에 탄을 채굴하던 탄과의 흔적을 관찰 할 수 있다.

트라이아스기 각섬석-흑운모화강섬록암은 광주 동부에 위치하는 소규모 저반이나 암주상 화강암 관입체들과 화순읍과 남서부에 북동-남서향의 암주상관입체로 소위 송림화강암류에 속하는 광주화강암류(김용준 등, 1993a, 1993b, 1995, 1998; 주승환과 지세정, 1990; 김종환 등, 1993)이며, 관입-정지 시기는 203~222Ma(주승환과 김성재, 1986; 김용준 등, 1990)으로 트라이아스기에 해당한다.

쥬라기 석영섬록암은 무등산 동남 산록에 소규모 암주들로서 분포하며, 신선한 암색은 암회색에서 담회색까지 점이적인 변화를 보이거나 풍화면에서는 황갈색을 띤다.

백악기 퇴적암-화성암류는 주로 화성쇄설암류와 화산성 퇴적물로 이루어진 퇴적암류(오례리층, 만월리 응회암층과 장동층). 화산암류(화순안산암, 도곡유문암과 무등산 석영안산암)와 화강암류(석영반암, 미문상화강암)로 구성되어 있다.

충적층은 무등산 골짜기와 산록지역에 분포하며 분급이 나쁜 모래, 빨, 및 자갈 등으로 구성되어 있다. 무등산 지역의 지질계통은 Table 2-1과 같다.

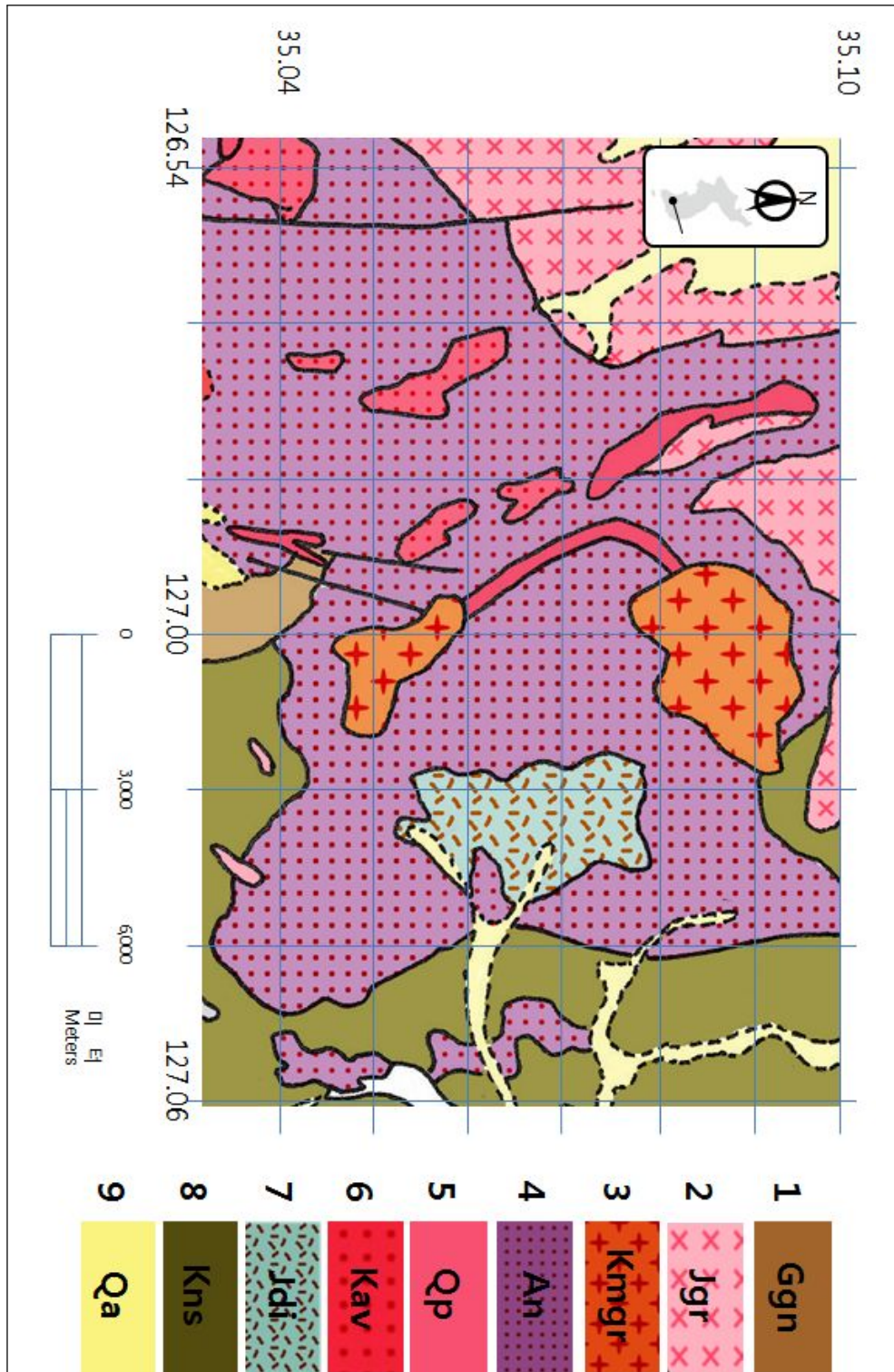


Fig. 2-1. Geological and rock sampling site map of Mt. Mudeung area.
 1; Pre-cambrian granite gneiss, 2; Gwang-ju granites,
 3; Micrographic granite, 4; Andesite or Dacite, 5; Quartz porphyry,
 6; Rhyolite, 7; Diorite, 8; Sandstone or Mudstone, 9; Alluvium.

Table 2-1. Geological sequence of Mt. Mudeung area.

Quat.	Alluvium	
	~ ~ Unconformity ~ ~	
	Dikes	Bulguksa intrusive rocks
	--- Intrusion ---	
	Micrographics granite	
	--- Intrusion ---	
	Quartz porphyry	Yucheon Group
	--- Intrusion ---	
Cret.	Mudeungsan dacite	
	--- Intrusion ---	
	Dogok rhyolite	
	Changdong Formation	
	Hwasun andesite	
	Manweol-san tuff	
	Orei Formation	
	~ ~ Unconformity ~ ~	
Jura.	Quartz diorite	
	--- Intrusion ---	
Tria.	Hornblende-biotite granodiorite	
	---Intrusion---	
Paleo.	Meta-Pyeongang Supergroup	
	~ ~ Unconformity ~ ~	
Pre-Camb.	Granite gneiss	

제2절 암석기재

본 지역에 분포하는 화성암류는 트라이아스기 각섬석-흑운모화강섬록암, 주라기 석영섬록암 그리고 백악기의 화산암류인 화순안산암, 도곡유문암, 무등산석영안산암, 석영반암과 맥암류로 구성되어있다.

트라이아스기 각섬석-흑운모화강섬록암과 흑운모화강섬록암은 소위 광주화강암체에 속하는 암상들(김용준 등, 1993)로서 광주화강암은 각섬석-흑운모화강섬록암, 반상화강암, 흑운모화강암, 복운모화강암으로 구분된다(김용준 등, 1993). 이들은 균질한 중립 또는 조립의 화강암질암이며, 주 구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모와 각섬석이고, 부 구성광물은 저어콘, 인회석, 스펀과 불투명광물이다. 각섬석-흑운모화강섬록암과 흑운모화강암은 광주시 서구 풍암동에서 회색의 괴상암체로서 관찰되나, 화방산 부근에서는 전단작용을 받아 무수한 소규모의 단층과 뚜렷한 엽리가 발달한다.

본암의 암상은 무등산 서쪽 기슭과 화순읍 남부에도 소규모 암주상 관입체로 분포하며, 특히 조선대학교 본관 뒤편에 노출된 200 m에 달하는 절벽에서 관찰할 수 있는데 비교적 큰 자형의 각섬석 결정들을 함유하는 조립질 암상과 그밖에 광주화강암류 분포지역에서 발견되는 세립의 침상이나 주상결정의 각섬석을 함유하는 중립질 암상으로 구성된다. 조립질 암상이 심하게 초생변질작용(deuteric alteration)을 받는데 비하여 중립질 암상은 거의 변질되어 있지 않은 것이 특징이다. 화강섬록암은 화순군 이서면 영평리(OK목장 내)에서는 특이한 핵석으로 관찰된다.

석영섬록암은 무등산 동남부에 해당하는 안양산 남부지역에 소규모 암주상으로 산출되며, 대부분 채석장(대보석재 갈두리 채석장과 삼신석재 새터 채석장)으로 개발되어 채굴되고 있거나 채굴되었던 채굴적이 관찰된다. 이들 암체에서 관찰되는 암색은 암체 연변부에서는 암회색 또는 암청색을 띠는데 비하여 암체 중심부로 갈수록 밝아져서 담회색 또는 회색을 띠며, 이 암색 변화는 암체 연변부로 갈수록 유색광물의 함량 증가에 따른 색지수의 증가 때문이다. 섬록암을 암색에 따라 구분해보면 적어도 세 가지 이상으로 구분 가능하나 이 논문에서는 구분하지 않았다. 그리고 밝은 암상은 어두운 암상을 관입 및 포획하는 것이 관찰되는 것으로 미루어 이들 암상들은 분화과정에서 열분산작용으로 초기 분화상에 속하는 어두운 암상이 냉각 시 형성된 절리 등을 따라서 후기 암상에 속하는 밝은 암상이 관입하거나 포

확하여 이루어진 것으로 사료되나 석영섬록암의 주조성광물은 사장석, 일반회석, 흑운모, 석영과 자철석으로, 부 조성 광물은 녹염석, 녹니석등으로 이루어져 있다.

화순안산암은 중생대 백악기 중엽에 무등산을 중심으로 북동-남서 방향으로 광범위한 안산암질 화산활동이 시작되었다. 화산활동 초기에는 마그마를 공중으로 폭발시키거나 화산쇄설류를 만들어 주로 안산암질 화산력 응회암을 형성시켰고, 후기에 접어들면서 안산암질 용암이 집중적으로 분출되었다(94.3 ± 1.3 Ma; Kim, personal communication). 이들은 현재 무등산의 몸체를 이루고 있다. 초기에 형성된 화산력 응회암은 광주광역시 지원동에서 화순읍 북서부에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 광주와 화순의 경계부인 주남마을 입구에서 관찰되는 화산력응회암은 녹회색 또는 자갈색을 띠는 5~10mm 내외의 담녹색 암편과 부석 등을 함유하는 화산력응회암이다. 안산암질 용암은 여러 차례 분출한 용암층으로 신선한 부분은 암녹색에서 암회색 또는 보라색에서 붉은 갈색을 나타낸다. 안산암질 용암은 광주광역시 동구와 남구를 지나는 제2순환로 절개지에서 쉽게 관찰된다. 또한 증심사 주변의 계곡이나 운림동 동산마을 하상, 소태IC에서 주남마을 사이의 도로변에도 신선한 암석이 노출되어 있다. 안산암질 용암에는 방해석 암맥과 함께 다양한 크기의 형태의 행인이 관찰된다. 타원형과 찌그러진 형태의 백색 행인은 옥수, 녹색의 행인은 대부분 녹염석으로 이루어져 있다(Fig. 2-2).

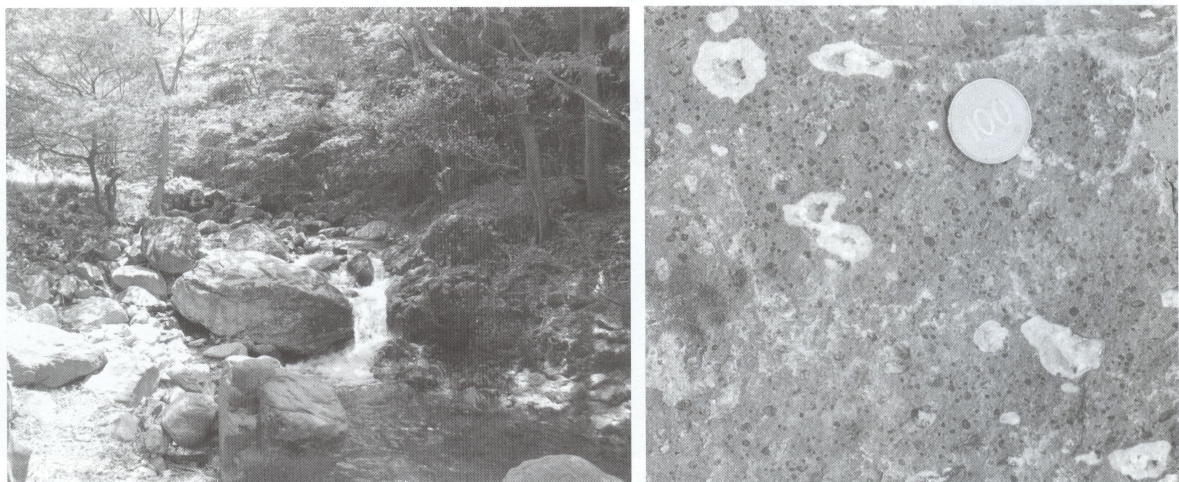


Fig. 2-2. Outcrop and amygdaloidal structure of Hwasun andesite at the Jeungsimsa valley.

유문암은 실리카가 많이 함유된 화산암이다. 이 암석은 양적으로 현무암보다는 현저하게 적지만 그래도 지표에 넓게 분포되어 있다. 현무암과 마찬가지로 유문암도 맨틀 플룸의 상부, 열곡대, 암판의 수렴대 또는 대륙의 충돌지역과 같은 다양한 지구적 환경에서 산출된다. 이 암석은 해양환경에서는 드문 반면 대륙에서는 매우 흔하다. 현무암과 같이 유문암도 암석 성인적 논쟁의 대상이다(Loren A. Raymond, 1995). 유문암은 석영-장석 반암 유리 및 여러 종류의 화성쇄설암으로 산출된다. 석영과 새니딘 뿐만 아니라 흑운모, 사장석, 아놀소클레이스, 자철석 등이 반정으로 관찰된다. 유문암질 유리와 용암은 성층화산에서 돔이나 비교적 단거리의 용암류를 형성하거나 독립된 돔(dome)군 또는 주 순상화산에 수반된 규질 화산에서 또는 칼데라의 내부나 주변에서 산출된다. 유문암의 조직은 완유리질로부터 완정질에 이른다. 특히 반정질 암에서 반상 조직은 흔히 관찰된다. 유문암은 유문암질 마그마의 특히 높은 점성으로 인하여 분출이나 유동 시에 특징적인 구조를 이루는데, 이 용암은 점성이 높기 때문에 긴 용암류나 분출암상 보다는 짧은 용암류와 돔을 이룬다. 유동띠는 유문암에서 흔한 구조이며, 이와 관련하여 리소피시 구조가 곳에 따라 발달하고 화성쇄설암에서 성층은 전형적인 구조이다(Loren A. Raymond, 1995). 유문암은 대륙 또는 조산대의 화산분출물로 산출된다. 육안으로 유문암은 세립 또는 유리질로 담회색~담갈색, 백색 등이며, 유리가 많은 것은 흑색이고 윤이 난다. 유리구조가 보이는 것이 많고, 일반적으로 반상조직으로 산출되며 석기는 완정질에 가까운 것에서 유리질까지 있다. 완정질에 가까운 석기는 세립의 입상, 조면암조직과 그레노파이어조직 등을 나타내며, 은미정질의 것도 있다. 유리질의 석기는 미정을 포함하거나 유상조직 및 구상조직을 나타내는 것도 있다(Ahn, 2013). 본 연구 지역의 유문암은 백악기(92.7 ± 0.9 Ma; Kim, personal communication)에 화성쇄설물이 공중으로 폭발하여 쌓인 이후 용암이 흘러나와 형성된 산성 화성암체로 무등산 남서쪽에 수직 절벽으로 둘러싸인 돔상의 지형이 형성되어 있으며, 유사한 지형은 서구의 금당산에서도 관찰된다. 이 유문암은 무등산 남서부인 능주 지역에 광범위하게 분포하며 도곡유문암이라고 불린다. 무등산에 분포하는 도곡유문암은 담홍색을 띠며 대부분 유상구조가 발달된 유문암으로 특징적으로 관찰되는 곳은 새인봉과 마집봉이다. 유상구조는 대개 2~5mm 두께의 홍색대와 담색대가 교호하는데, 구분이 희미한 곳에서는 규장암처럼 관찰된다. 유문암은 연속적인 수직절벽을 이루며 측면에는 수직절리가 잘 발달하여 있고, 정상부로는 수평절리가 발달하여 있다. 새인봉은 돔상의 화산체가 도장 모양이라 하여 붙여진 이름이다(Fig. 2-3). 새

인봉과 계곡을 사이에 두고 마주보는 마집봉에는 절리를 따라 풍화되어 형성된 천연동굴(높이 약 3m, 폭 약 8m; Fig. 2-4) 과 관상으로 떨어진 암편으로 쌓아 만든 여러 개의 인공적인 석탑이 세워져 있다.

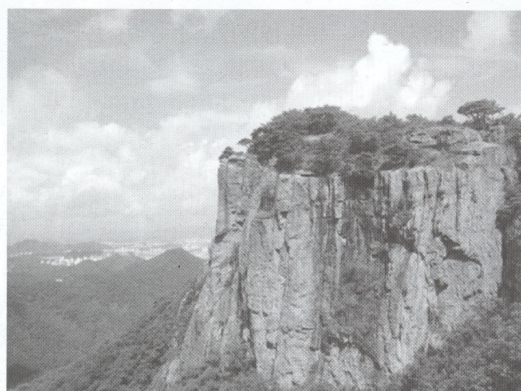
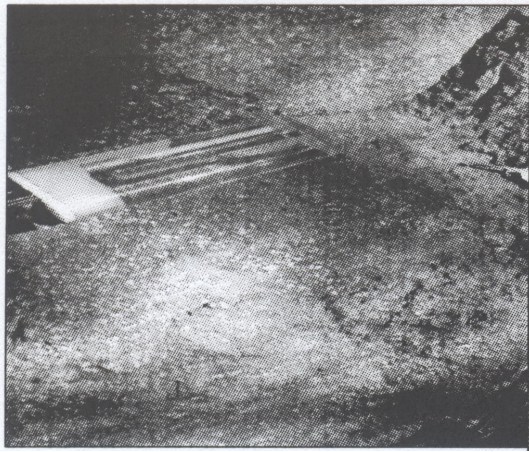


Fig. 2-3. Vertical joint of the Dogok rhyolite at the Seoinbong.



Fig. 2-4. A rhyolite cave near the majibbong.

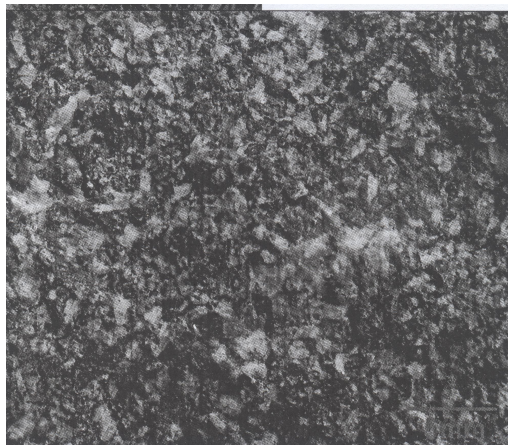
무등산 석영 안산암은 안산암의 한 종류로써, 석영을 다량 포함하고 있는 암석으로, 실리카 광물이 풍부한 규장질 화산암 중에서 사장석 정장석인 것을 테사이트라 한다. 이 정의에 따르면 SiO_2 함량은 대체로 60~75 wt.% 사이에 들어가는데, 이는 유문암과 거의 동일하다. 그러나 SiO_2 함량이 60~70 wt.% 정도를 테사이트, 70 wt.% 이상을 유문암이라 부르기도 한다. 많은 테사이트는 칼크 알카리 계열에 속하지만 때때로 쉐레아이트 계열의 암석도 있다. 테사이트는 조산대의 화산분출물로 산출하며 반상조직을 갖는다. 석기는 유리질에서 결정질까지 다양하다. 유리질 석기는 가끔 미정이 많이 포함되어 있다(안건상, 2013). 이 암석의 분포를 보면 무등산의 정상부인 천왕봉을 포함하여, 서석대, 입석대, 북봉(누애봉), 북산(신선대), 중봉, 규봉암(광석대) 등 주상절리를 이루는 암석은 풍화에 강한 석영안산암이다 (Fig 2-5). 이 암석의 신선한 면에서는 짙은색 바탕에 백색 광물이 촘촘히 들어 있어 전체적으로는 회색을 나타내는데, 풍화된 면은 회백색, 녹회색 또는 거의 백색을 나타내기도 한다. 이 암석의 결정 입자는 사장석, 알카리장석, 석영, 단사휘석 등이며, 암편은 주로 유문암과 같은 화산암편이다. 이 암석의 이름은 석영안산암과 테사이트가 혼용되고 있다. 최근까지 이 암체는 용암류에 의해 형성된 것으로 해석해 왔다(김봉균과 박병권, 1966; 김용준 등, 2002; Ahn, 2010). 그러나 김용준 등.(2002)은 유리질 바탕에 미약한 용결구조를 보이는 부분을 발견하여 일부는 용결용회암일 가능성을 제시한 바 있다.



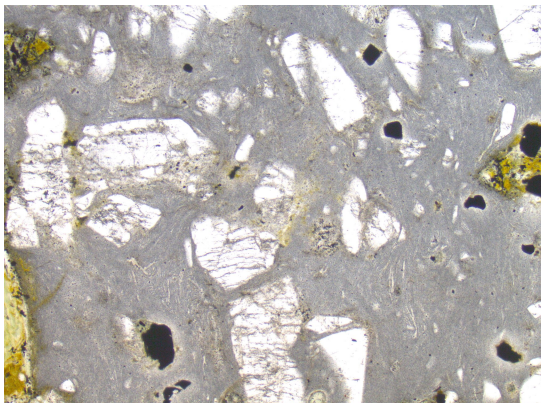
(a)



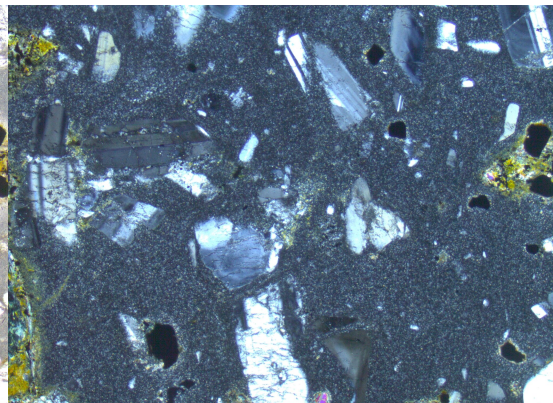
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 2-5. Photo of outcrop and micro photograph of Dacite at Mt. Mudeung area.

(a), (b), (c) Outcrop Dacite, (d) Microphotographic of Dacite (open nicol, $\times 50$), (e) Microphotographic of Dacite (cross nicol, $\times 50$).

무등산의 다양한 고도에 분포하는 본암에서 화산력(lapilli) 크기의 암편과 부서편이 관찰되었다(Fig. 2-6, 2-7). 또한 입석대와 같은 정상부에서도 수평방향으로 반복되는 엽리와 신장된 피아메가 관찰되며, 사장석 반정들이 과편화되어 있으며, 용결구조도 관찰된다(Fig. 2-8). 따라서 무등산의 주상절리를 이루는 암석을 용결응회암으로 해석할 수 있다. Huh et al.(2013)에 의하면, 무등산 주상절리대를 형성시킨 마그마의 분출시기를 크게 네 그룹으로 나눌 수 있다. 가장 먼저 분출한 첫째 그룹은 촛대봉과 백마능선으로 87 Ma 이전에 분출하였다. 둘째 그룹인 동화사 터 및 신선대는 87~85 Ma에, 셋째 그룹은 광석대 및 방송탑과 입석대 및 서석대로 85 Ma에 분출하였다. 마지막으로 무등산 정상부인 천왕봉과 지왕봉은 85 Ma 이후에 분출하였다.

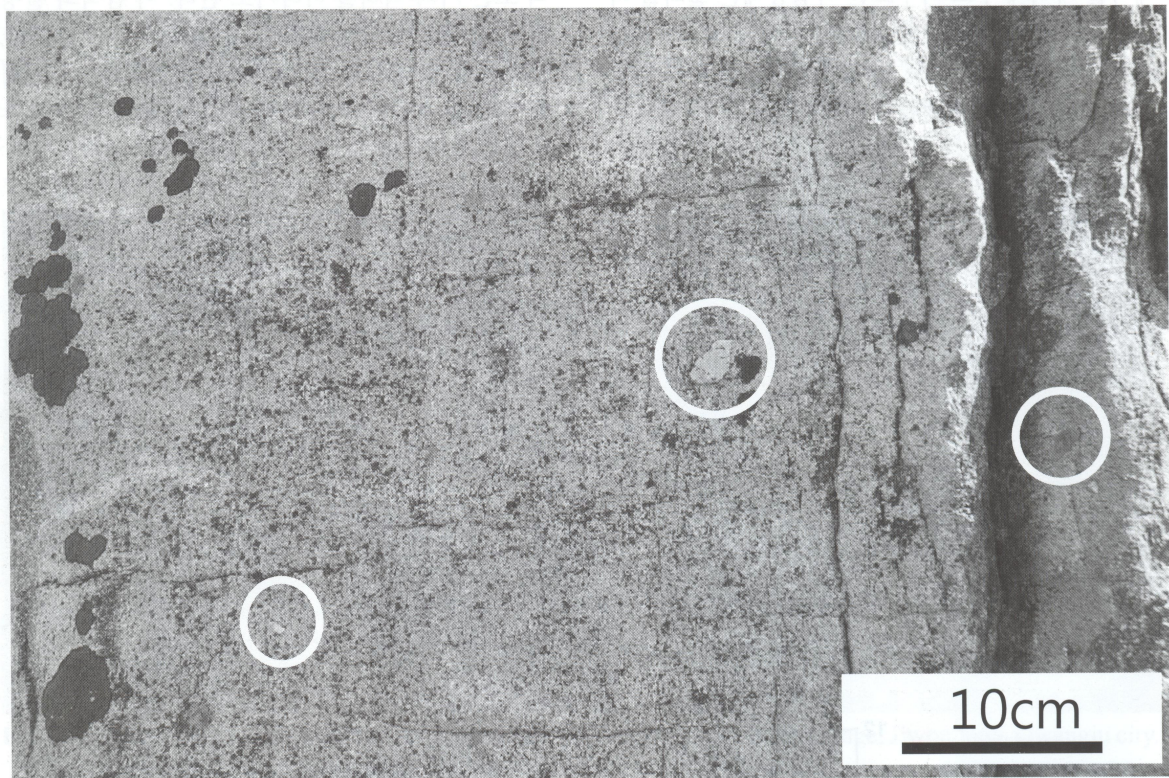


Fig. 2-6. Lapilli on lamination and vertical joint of the Mudeungsan quartz andesite at the Jangbulje.

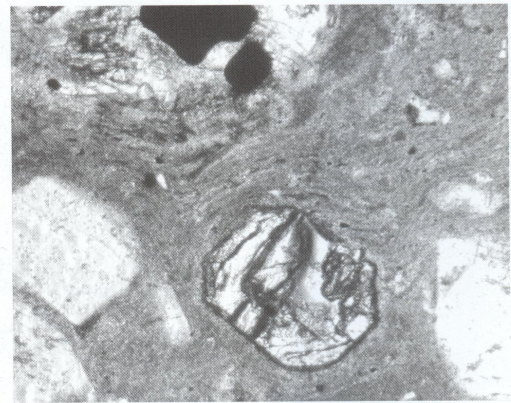
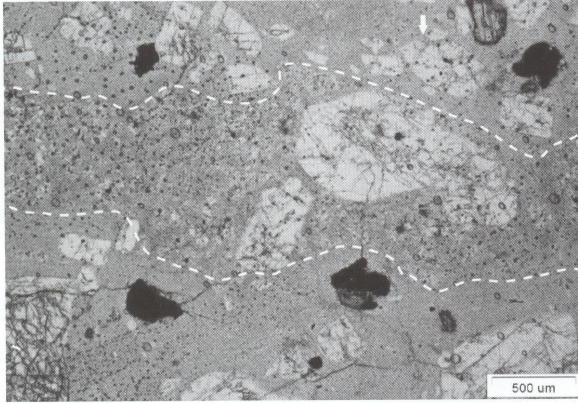


Fig. 2-7. Fiamme in lamination of the Mudeungsan quartz andesite.

Fig. 2-8. Flow structure of lamination

석영반암은 관입암체로 산출되는 반상 화성암이다(Fig. 2-9). 회백색 내지 담황색을 띠며, 알칼리장석과 석영이 반정을 이루고, 흑운모, 각섬석, 휘석을 소량 함유한다. 유문암보다 결정도가 높고 잠정질 또는 미정질이다. 화강암에 가까운 것은 특히 화강반암이라고 한다. 반정을 이루는 광물은 알칼리장석과 석영이며, 석영은 흔히 용식된 형태로 되어있다. 흑운모나 각섬석 또는 휘석을 소량 함유하고 있는 것이 보통이다. 석기는 유문암보다 다소 결정도가 높고, 잠정질 또는 미정질이며, 미화강암 조직이나 미문상조직이 있는 것도 있다. 특히 문상이 현저한 것은 문상반암이라 한다. 화강반암은 화강질암에 수반되어 화학조성과 광물조성이 화강암질암과 흡사한데, 반상조직을 보이는 암석이 자주 산출된다. 반정은 석영, 장석, 운모 등이고, 석영 반정의 양이 많을 때는 석영반암, 장석반정이 많으면 장석반암으로 부른다(안건상, 2013). 무등산의 석영반암은 상당히 좁은 폭의 관입암맥류로 산출되어지고, 분포지는 무등산 군사도로길 주변으로 바람재기점~봉황대기점~중머리재를 잇는 남남동(SSE) 쪽을 향하는 좁은 폭에 비교적 길게 산재되어 있고, 무등산 서측 산사면에서 고도 500m 정도에 위치하는 폭 300m 내외의 환상 암맥으로 화순안산암과 무등산 석영안산암의 경계부를 따라 거의 수직으로 관입 분포한다. 석영반암의 주조성 광물은 석영, 사장석, 정장석과 흑운모로, 부조성 광물은 자철석 등으로 구성되며, 석기는 미정질의 석영과 장석으로 이루어져 있다. 석영반정은 거의 구형으로 보이는 자형 결정으로 이루어져 있으며, 결정면이 쉽게 인지되고 부분적으로 석기에 의하여 용식되거나 만곡된 결정면도 관찰된다(김용준 등, 2002).

미문상화강암이라고 하는 것은 괴상 화강암인 경우 전체 용적의 30 wt.% 이상이 미문상 조직을 보이거나 등립상 조직 또는 반상 조직의 석기에서 미문상 조직을 30 wt.% 이상 나타내는 암석을 말한다(신인현, 1994). 직경 1km 내외의 암주상으로 산출되며, 연구 지역에서 가장 후기에 생성된 화강암으로, 비교적 세립의 기질에 장석반정을 함유하는 회백색 내지 담홍색을 띠며, 노두에서 박리작용을 흔히 관찰할 수 있고, 직경 2~3mm의 미아플리틱 기공과 소규모의 섬록암질 포획암을 포획하며 적철석을 함유한 천소관입암의 특징을 갖는다. 이 지역의 미문상화강암은 무등산 지역에서 원효사 주변인 산장 및 충장사 일대에서 장년기 지형을 이룬다.

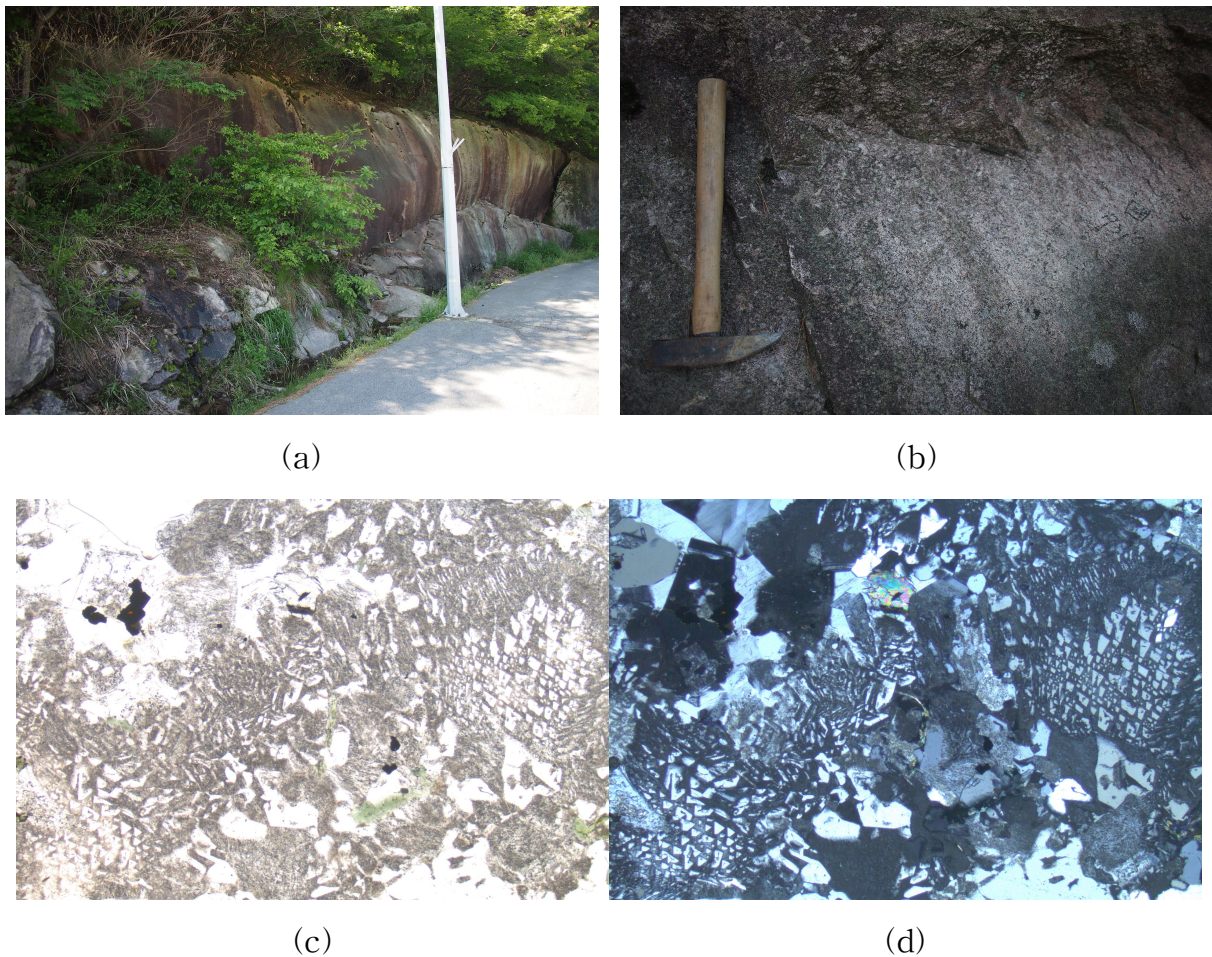


Fig. 2-9. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Wonhyo temple.

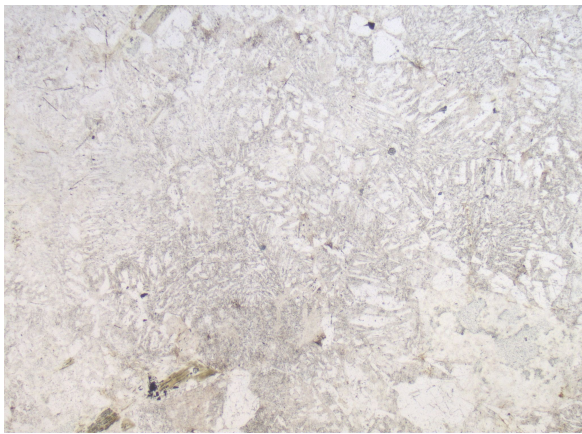
- (a) Outcrop of Micrographic granite near Wonhyo temple.
- (b) Outcrop of Micrographic granite(hammer).
- (c) Microphotographic texture in Micrographic granite (open nicol,×50).
- (d) Microphotographic texture in Micrographic granite (cross nicol,×50).



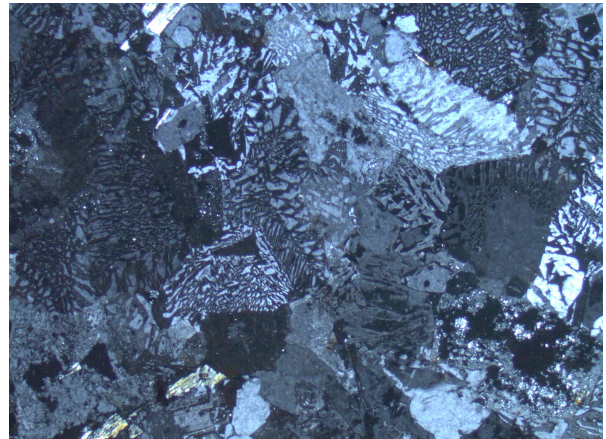
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2-10. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Cheonggokri.

(a) Outcrop of Micrographic granite near Cheonggokri.

(b) Outcrop of Micrographic granite.

(c) Microphotographic texture in Micrographic granite (open nicol,×50).

(d) Microphotographic texture in Micrographic granite (cross nicol,×50).

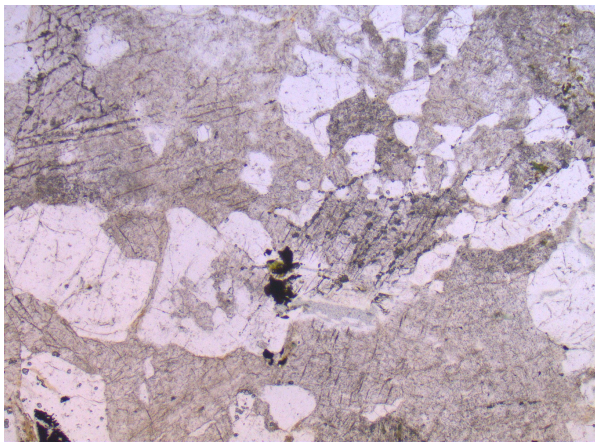
백악기말 급격한 분출로 인해 타원형의 함몰이 일어났고, 마그마첼버에 남아있던 마그마는 함몰체를 따라 형성된 환상의 열극대를 따라 관입하여(82.7±1.4 Ma; Huh et al., 2013) 여러곳에 암주상의 미문상화강암을 형성하였다. 무등산 가까운 열극에 관입한 것이 무등산 북사면의 원효사(Fig. 2-9), 정곡리(Fig. 2-10), 남사면의 수만리이고(Fig. 2-11), 윤필봉과 의상봉(Fig. 2-12), 그리고 바깥쪽 열극대를 따라 관입하여 형성된 미문상화강암체가 무등산 서부지역인 금당산과 화방산이다.



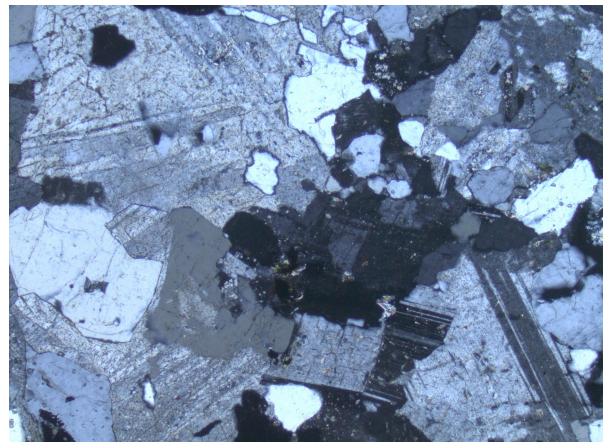
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2-11. Photo of outcrop and micro photograph of Micrographic granite, at the Soomanri(coin).

(a) Outcrop of Micrographic granite near Soomanri.

(b) Zoning and albite twins of plagioclase in Micrographic granite (cross nicol, $\times 50$).

(c) Microphotographic texture in Micrographic granite (open nicol, $\times 50$).

(d) Microphotographic texture in Micrographic granite (cross nicol, $\times 50$).

특히 수만리 지역의 미문상화강암은 육안으로 보면 핑크장석이나 정동 구조가 보이고, 미문상화강암의 특징이 나타나나 현미경하에서는 미문상조직이 약하게 나타나는데 이는 이 지역 미문상화강암의 관입-정척 심도가 낮아 냉각과정에서 급격히 냉각되었기 때문인 것으로 사료된다.

일반적으로 나마는 산의 높은 정상부에서 발달하여 접근이 용이하지 않으나 의상봉의 나마는 누구나 손쉽게 관찰할 수 있으며, 형태도 매우 다양하여 지질학적 흥미를 유발시킨다. 의상대의 미문상화강암체 정상부에는 접시모양, 하트모양, 발바닥모양을 가진 나마(풍화혈)이 발달하는데, 최대 직경이 176 cm에 이른다(Fig. 2-12).

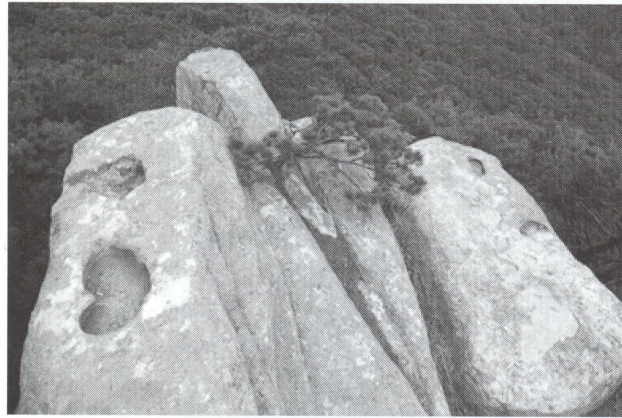


Fig. 2-12. Gnamma of micrographic granite at the Eusangbong (Peak).

투구봉에는 수직의 세로 절리를 따라 타포니가 발달되어 있다. 의상봉과 투구봉에서는 크기가 다양한 토르가 발달한다(Fig. 2-13). 윤필봉(해발 400m)에는 높이 3.7m, 폭 13m, 길이 21.4m 규모의 석굴이 발달하는데, 이는 국내에서 매우 희귀한 형태의 화강암 동굴이다(Fig. 2-14).

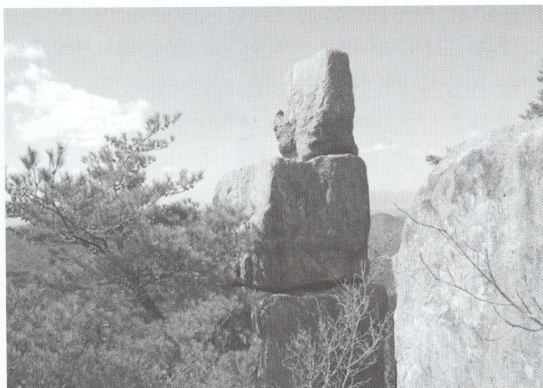


Fig. 2-13. A granite tor at the Tugubong (Peak).

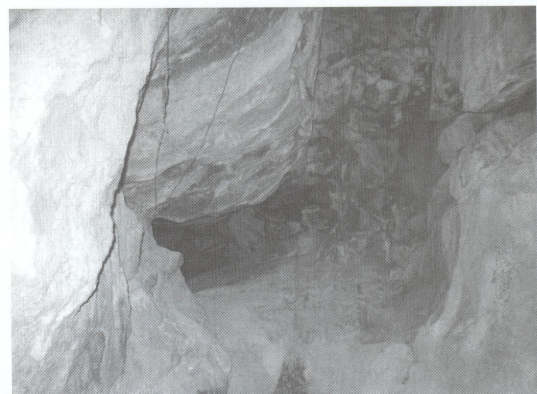
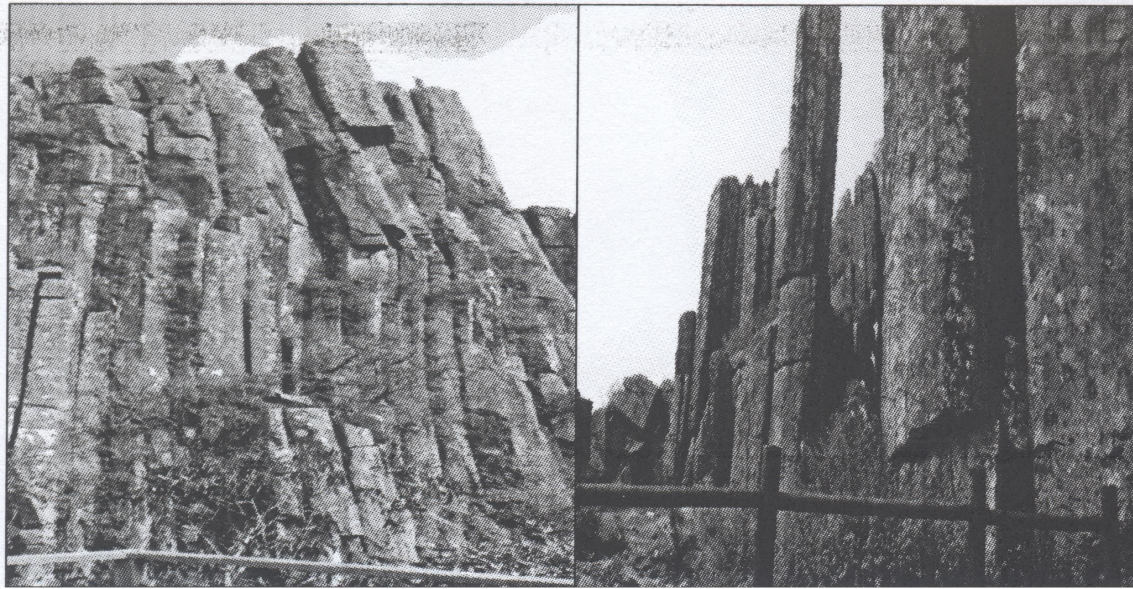


Fig. 2-14. A granite cave at the Yunpilbong (Peak).



(a)

(b)

Fig. 2-15. Colonnades of the Seoseokdae(a), and Ipseokdae(b).



(a)

(b)

Fig. 2-16. The Block stream of Mt. Mudeung.

무등산의 주상절리대는 고도 1,000m 가량의 고지대에 주로 분포하고 있으며, 이들 절리들은 석영을 다량으로 포함하고 있는 석영안산암으로 구성되어 있다. 풍화에 강한 석영안산암으로 구성된 무등산의 주상절리대는 무등산이 형성된 후 오랜 시간 칼데라 및 화구 등이 침식되어 그 흔적이 남아있지 않음에도 불구하고 그 형태가 잘 보존되어 남아있다. 서석대의 경우 직경 1~1.5m 가량의 사각에서 오각,

육각의 형태로 수m~30m 정도의 크기로 형성되어 있고, 절리면 사이로는 다양한 식생이 분포한다. 입석대는 서석대보다 풍화와 침식이 더 진전된 상태로 보여지며, 전반적으로 수직상 기둥이 서석대 같이 각이 진 것 보다는 다소 구상으로 풍화작용을 받아 핵석과 같은 둥근 형태를 나타낸다. 직경은 서석대와 마찬가지로 1~1.5m 가량이고, 오각에서 육각의 형태를 나타낸다. 여러 절리들이 서석대에 비하여 비교적 40m 내외로 넓은 간격으로 분포하며, 2~6개 가량의 개체가 탑을 이루듯이 불안정하게 쌓여 있다. 그 밖에 중봉과 중봉에서 서석대로 올라가는 지점에서도 곳곳에 소규모의 주상절리대가 나타나고 있으며, 이들 대부분이 풍화를 많이 받은 상태이다(Fig. 2-15). 그 밖에 무등산 정상에서 고도 약 400m 사이에 거력으로 덮여 있는 너덜(talus)이 사면 여러 곳에서 관찰된다(Fig. 2-16, 17).



Fig. 2-17. Colonnades of the Seoseokdae and block stream (photo by Jeong, S. J.).

제3장 암석 화학

본 연구지역에 분포하는 백악기 화강암류의 암석 지화학적인 자료를 이용하여 마그마의 근원물질, 마그마의 특성과 분화 및 관입의 구조적 환경을 밝히기 위하여 Harker의 변화도, 주성분과 미량성분 및 희토류 원소 간의 상호변화관계, 알카리와 SiO_2 의 상관도, AMF 삼각도와 미량성분 원소의 분별도 및 희토류 원소의 유형 등에 대하여 논의하고자 한다. 분석대상 시료의 채취지점은 Fig. 3-1과 같다.

제1절 주성분 원소

무등산 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학적 특성을 밝히기 위하여 미문상 화강암 8개, 석영반암 2개, 석영안산암 6개, 안산암 3개 등 총 19개 시료에 대하여 한국기초과학연구소의 XRF와 ICP-MS를 이용하여 주성분원소와 미량원소 그리고 희토류원소에 대한 화학분석을 실시하였다.

본 연구 지역에 분포하는 화성암류를 생성시킨 마그마에서 주성분 원소의 화학 분석치는 Table 3-1과 같으며, SiO_2 함량은 미문상 화강암이 65.85~74.45 wt.%, 석영반암이 67.45~68.01 wt.%, 석영안산암이 60.78~66.31 wt.%, 안산암이 54.03~55.08 wt.%로 안산암 석영안산암 석영반암 미문상화강암 순으로 증가하는 경향을 보인다.

SiO_2 함량에 대한 각 산화물의 변화도인 Harker(1909)의 성분변화도(Fig. 3-2)에 도시하면 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 무등산 지역에 분포하는 화성암류의 주성분 원소 중에서 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO, MgO, CaO, TiO_2 와 MnO은 SiO_2 의 함량 증가에 따라 감소하나, K_2O , Na_2O 는 증가 하는 경향을, P_2O_5 는 뚜렷한 변화를 보여 주지 않는다. 이와 같은 결과는 일반적인 화강암류에서 보이는 정상적인 분화 경향을 나타내며, SiO_2 의 함량에 대한 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 의 변화도에 의하면(Fig. 3-3) FeO/MgO는 증가하는 경향을 보이나, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 뚜렷한 경향을 보이지 않는데, 이것은 본역 미문상화강암이 대륙 주변부로부터 형성된 화강암질 마그마에 의해 생성된 것임을 시사하고 있다(Jin et al., 1981). 또한 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 와 MgO 대 CaO의 상관도(Fig. 3-4)에 의하면 대체적으로 CaO의 함량이 증가함에

따라 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 함량은 감소한다. 그러나 CaO 와 MgO 의 상호관계에 있어서는 CaO 의 함량이 증가함에 따라 MgO 의 함량도 증가한다. 이와 같은 결과는 calc-alkaline 암류에서 나타나는 일반적인 경향과 일치한다(Hess, 1989).

분화과정을 알아보기 위해 AFM ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$)의 삼각도(Fig. 3-5)에 점기해 보면, FM 쪽으로부터 A정점으로 점이하는 calc-alkaline 마그마의 분화 특징을 보여준다.

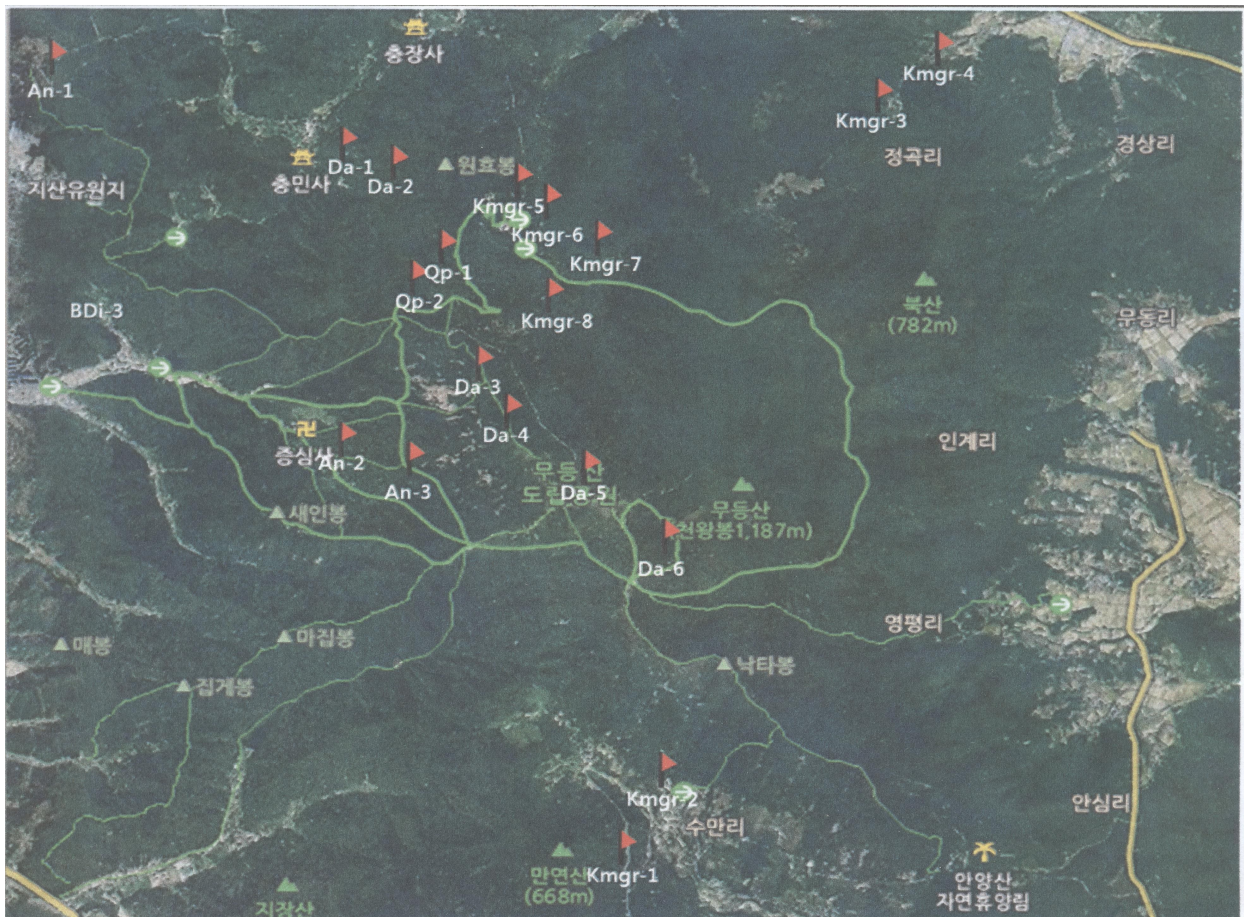


Fig. 3-1. Location of the samples that were used in the chemical analysis of the Mt. Mudeung area.

▶; sampling sites, An; Andesite, Da; Dacite, Qp; Quartz porphyry, Kmgr; Micrographic granite.

Table 3-1. Chemical compositions of major elements(wt. %) of the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

	Kmgr-1	Kmgr-3	Kmgr-4	Kmgr-5	Kmgr-7	Kmgr-8
SiO ₂	65.86	74.45	73.70	73.24	72.41	72.35
Al ₂ O ₃	14.62	13.19	13.13	12.97	13.01	13.21
Fe ₂ O ₃	4.74	1.79	1.82	1.99	2.24	2.31
MnO	0.17	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
MgO	1.84	0.36	0.35	0.47	0.47	0.48
CaO	3.33	0.24	0.23	0.95	0.98	0.99
Na ₂ O	2.89	3.12	3.25	3.11	3.62	3.79
K ₂ O	3.63	4.99	4.80	4.71	3.98	3.83
TiO ₂	0.79	0.64	0.57	0.50	0.63	0.60
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
L.O.I	0.87	0.87	0.69	0.82	0.69	0.82
Total	98.79	99.77	98.67	98.90	98.18	98.50

L.O.I : Loss-On-Ignition

Table 3-1. Continued.

	Qp-1	Qp-2	Da-1	Da-2	Da-3	Da-4
SiO ₂	67.45	68.01	66.31	65.21	64.15	60.78
Al ₂ O ₃	15.28	15.21	15.78	16.97	17.61	18.88
Fe ₂ O ₃	3.53	3.31	4.25	4.25	4.37	5.09
MnO	0.16	0.15	0.13	0.15	0.16	0.19
MgO	0.88	0.84	1.06	1.10	1.15	1.66
CaO	2.12	2.44	3.02	3.52	3.72	5.14
Na ₂ O	3.47	3.30	3.53	3.24	3.52	3.91
K ₂ O	4.27	4.12	3.76	3.53	3.27	2.45
TiO ₂	0.76	0.73	0.86	0.92	0.91	0.73
P ₂ O ₅	0.09	0.08	0.10	0.07	0.08	0.10
L.O.I	1.56	1.77	0.32	1.02	1.01	0.82
Total	99.55	99.96	99.18	99.98	99.96	99.74

	Da-6	An-1	An-2
SiO ₂	61.63	54.03	55.08
Al ₂ O ₃	18.24	18.01	17.27
Fe ₂ O ₃	5.19	7.33	7.14
MnO	0.19	0.19	0.19
MgO	1.60	3.70	3.83
CaO	4.85	7.23	7.09
Na ₂ O	3.76	2.78	2.79
K ₂ O	2.66	2.86	2.82
TiO ₂	0.92	0.99	0.91
P ₂ O ₅	0.09	0.22	0.22
L.O.I	0.72	2.58	2.61
Total	99.85	99.92	99.95

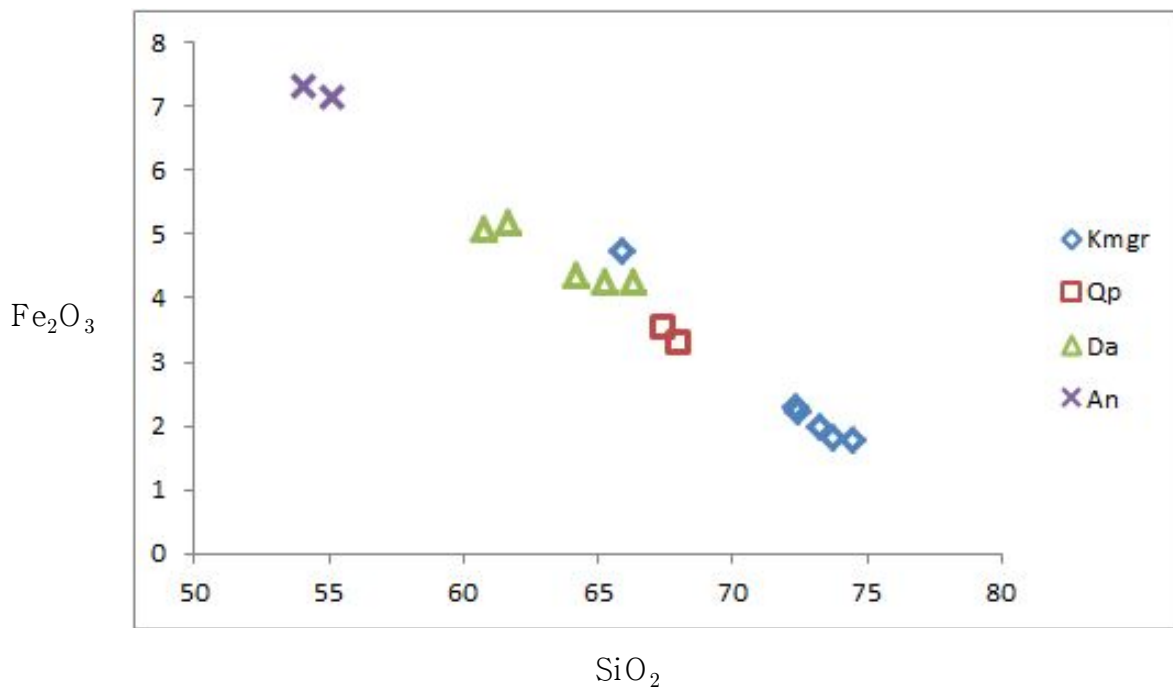
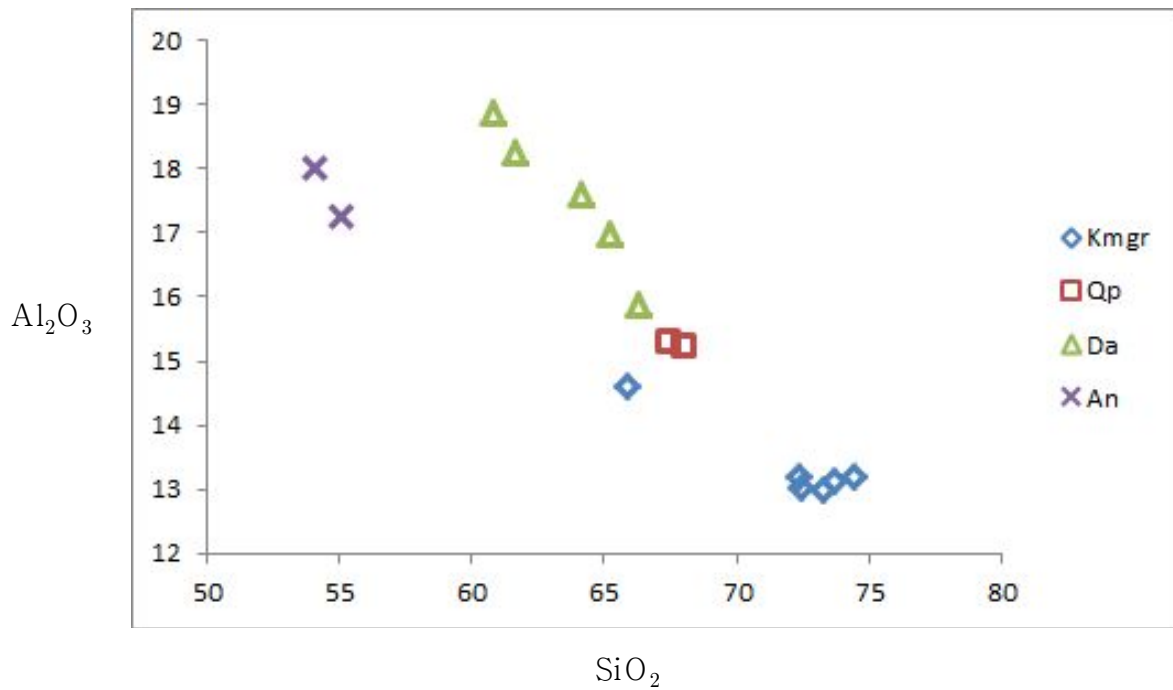


Fig. 3-2. Harker diagram of major elements(wt.%) for igneous rocks in the Mt Mudeung area. Symbols are same as those of Fig. 3-1.

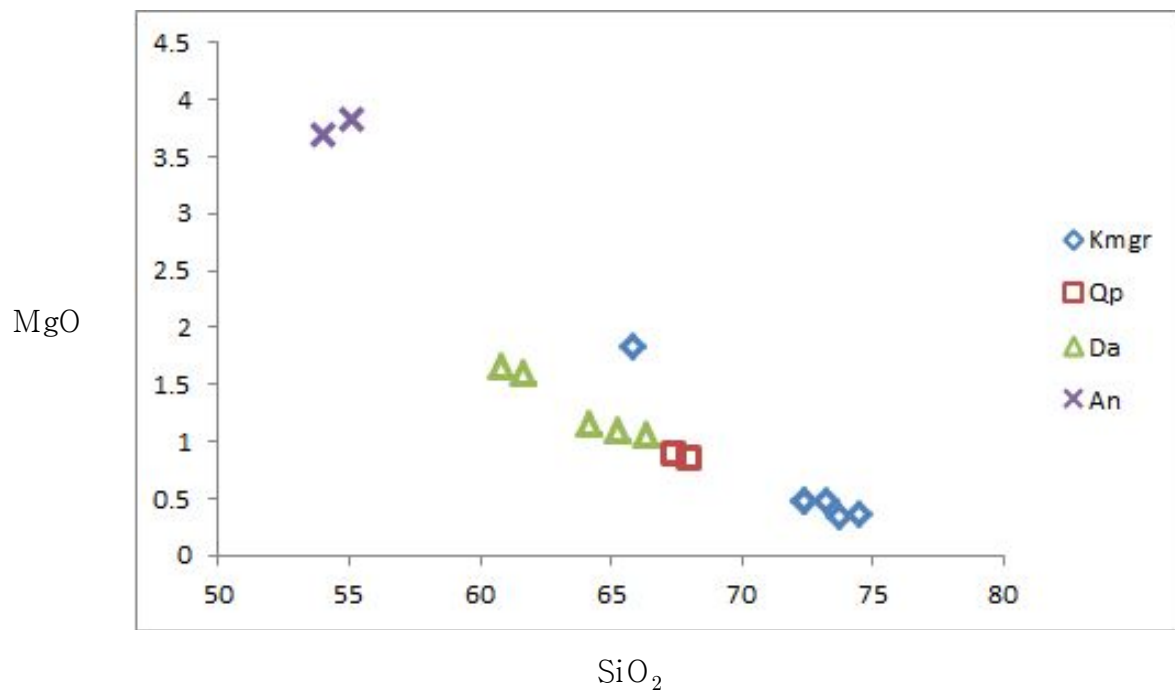
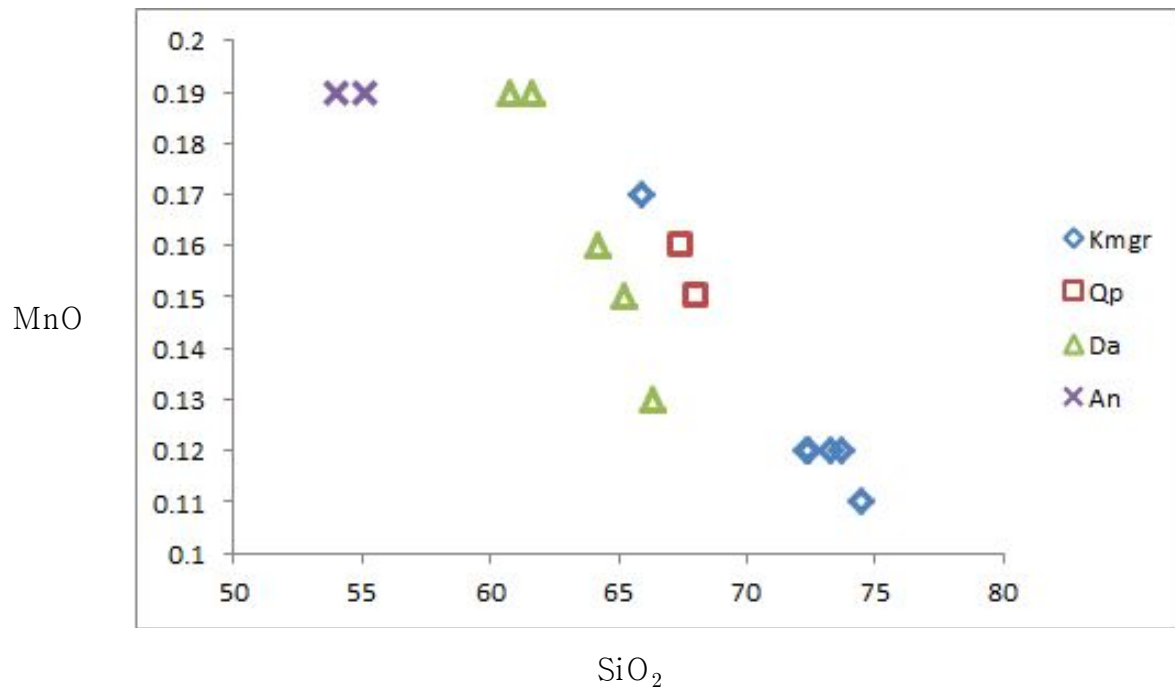


Fig. 3-2. Continued.

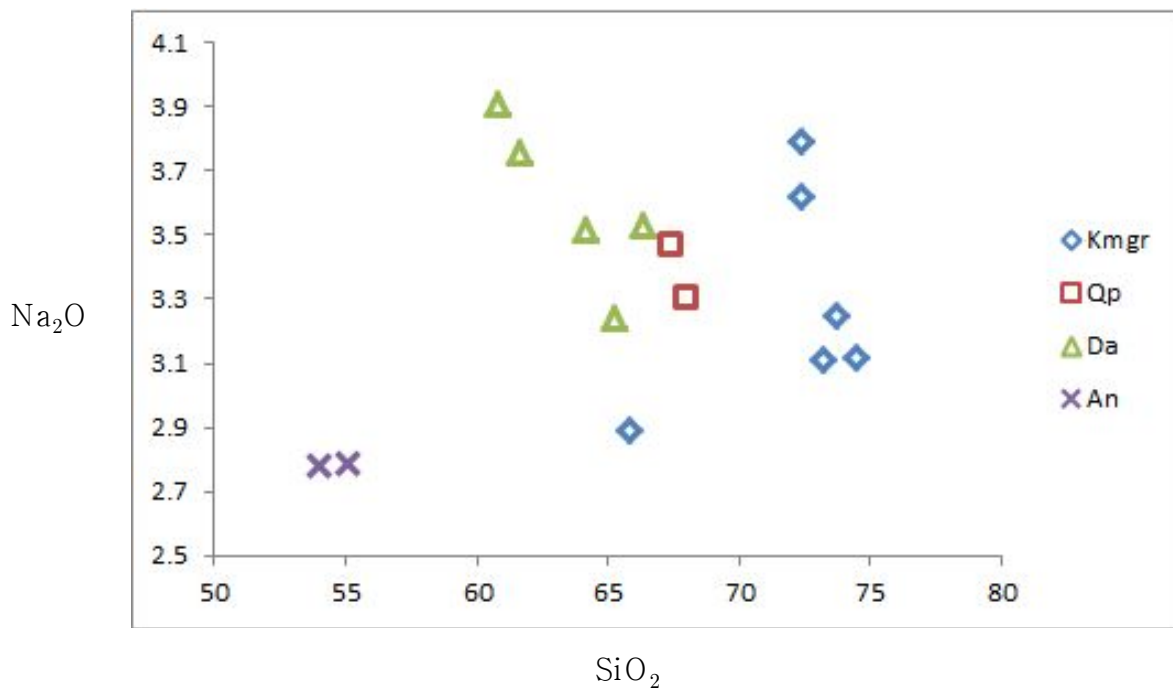
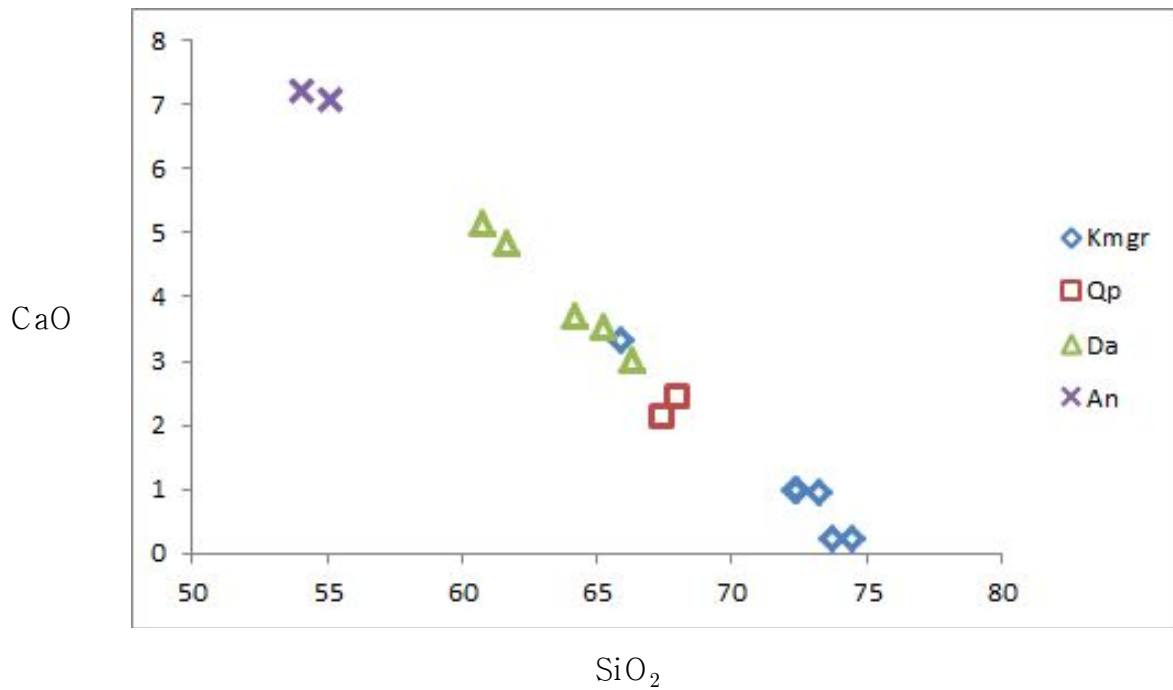


Fig. 3-2. Continued.

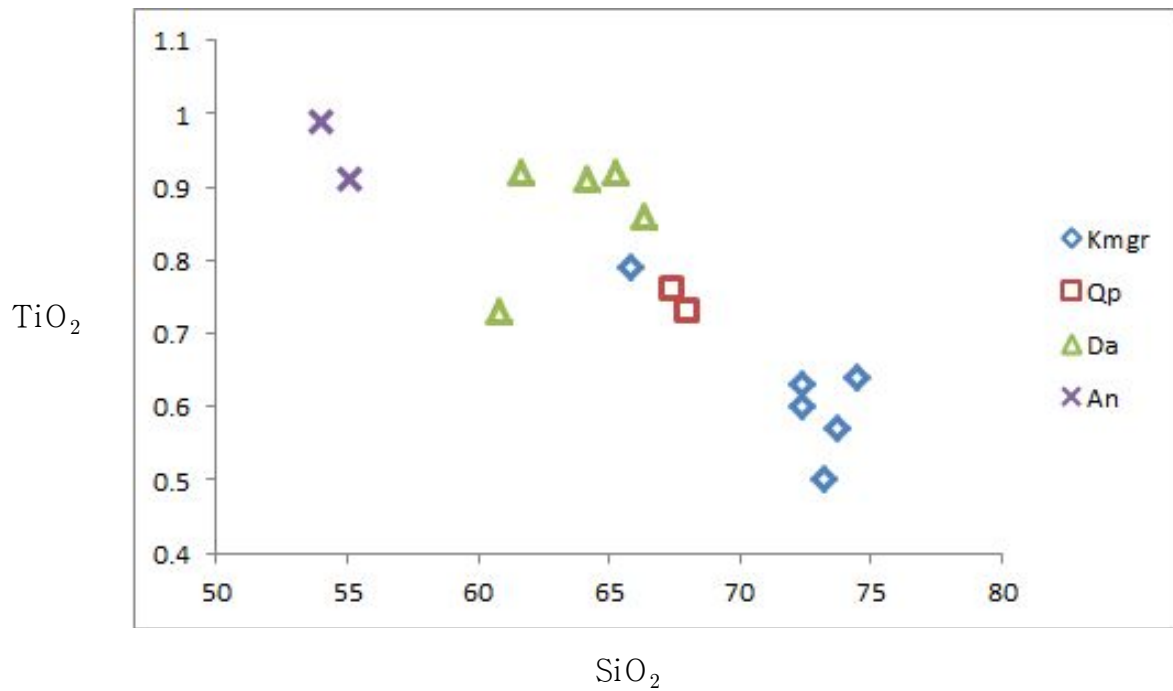
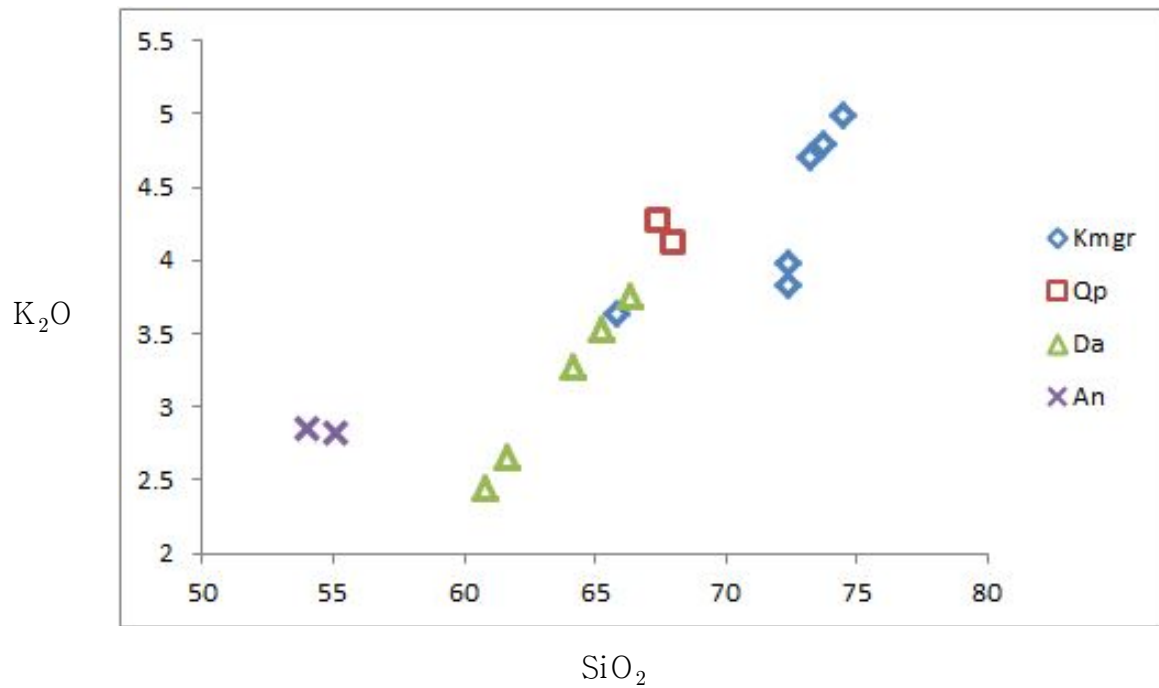


Fig. 3-2. Continued.

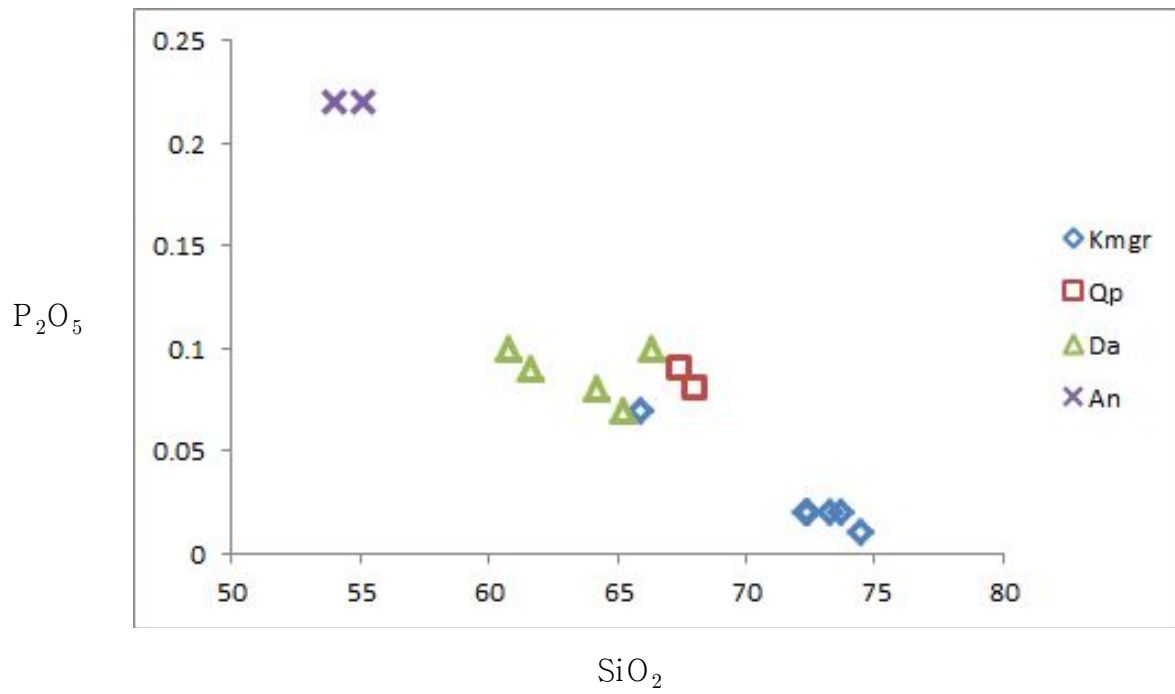
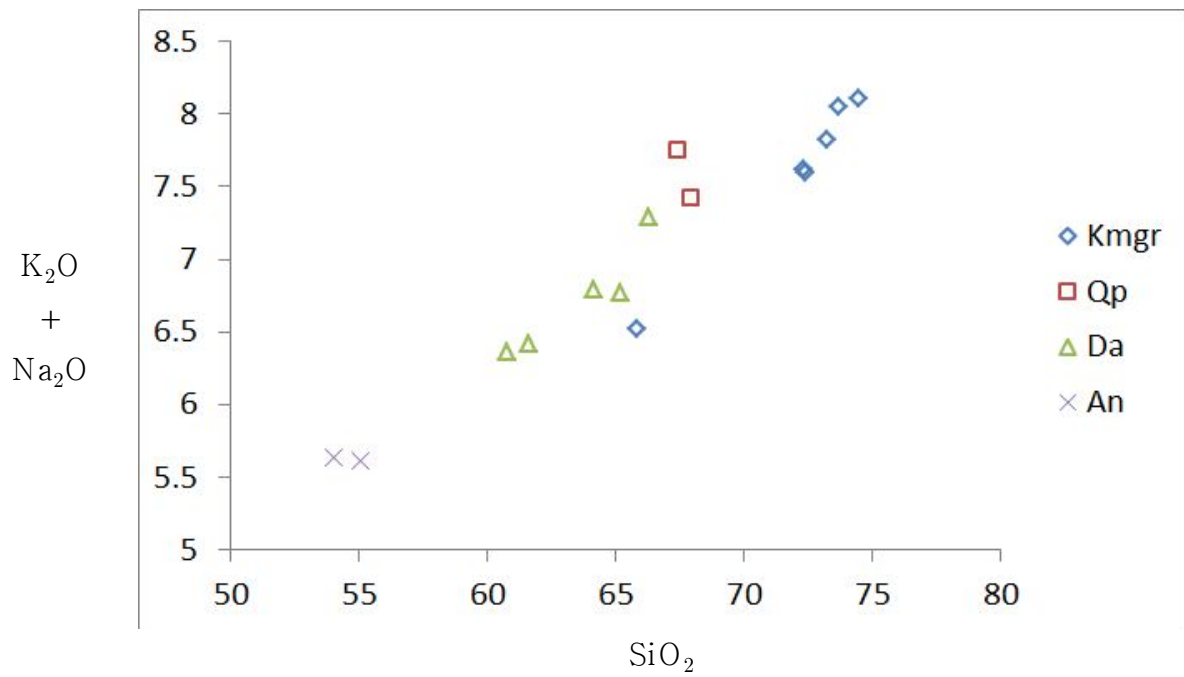


Fig. 3-2. Continued.

(a)



(b)

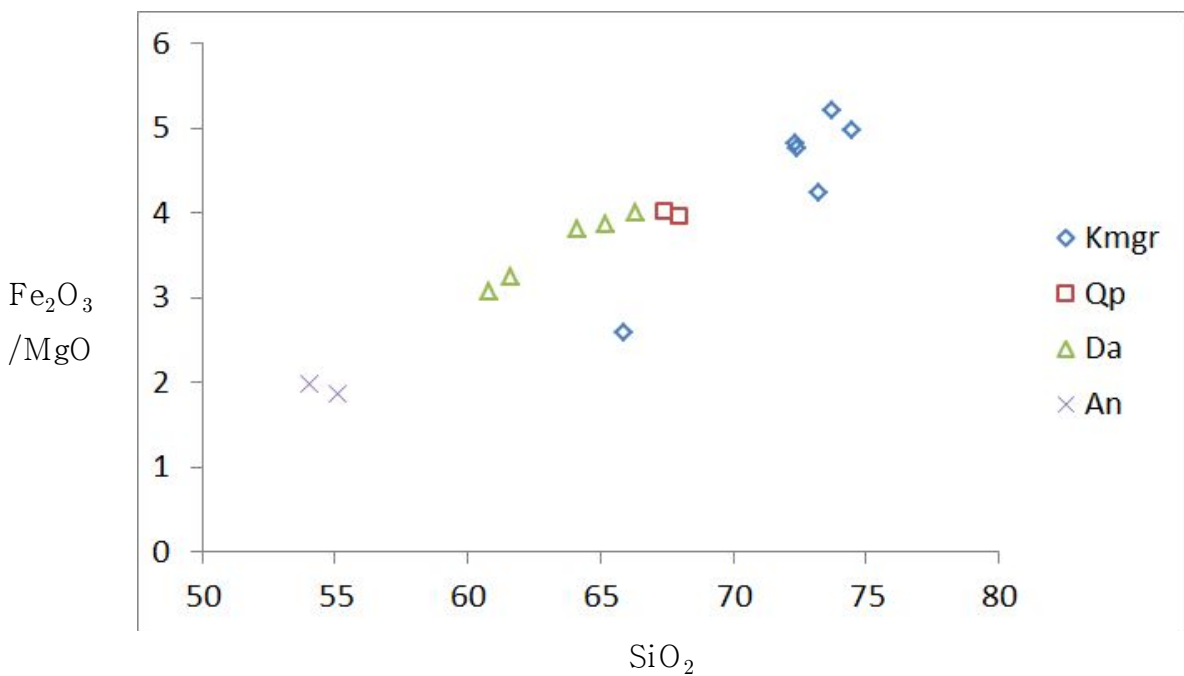
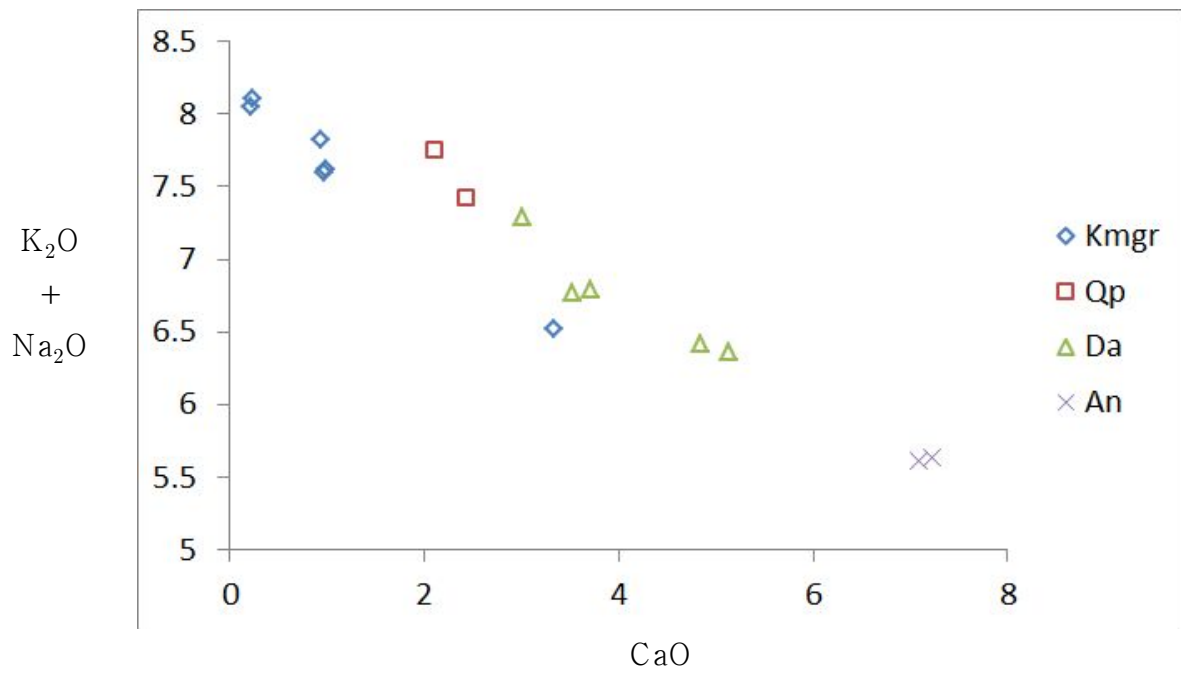


Fig. 3-3. The relationships between SiO_2 (wt.%) and (a) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, (b) alkali and in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

(a)



(b)

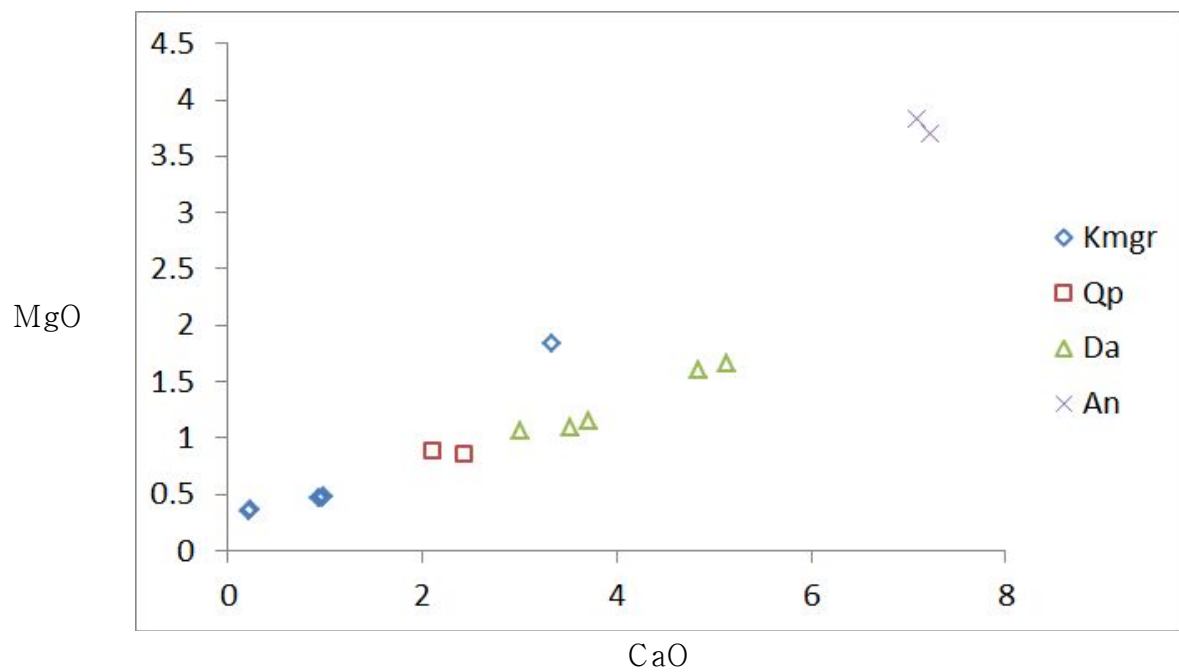


Fig. 3-4. The relationships between CaO content and (a) total alkali, (b) MgO in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

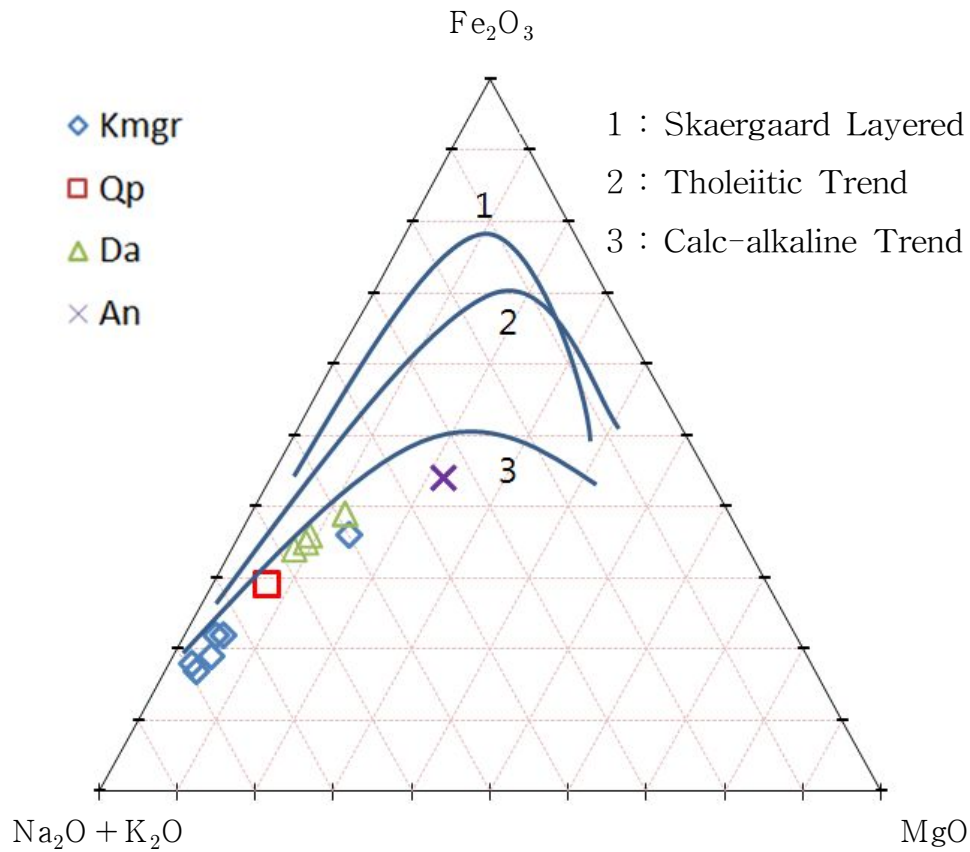


Fig. 3-5. Triangular diagram of AFM ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.(after Brown et al., 1984)

제2절 미량성분 원소

미량성분 원소는 전하 및 이온 반경의 차이에 의해서 주성분 원소를 함유하는 결정격자 내에 위장, 포획 및 허용되어 함유되므로 마그마의 진화와 밀접한 관계가 있다(Mason and Moore, 1982). 무등산 일대에 분포하는 화성암류에 대한 미량원소의 분석치는 Table 3-1과 같으며 본역 화강암류, Jin (1988)에 의한 남한의 백악기 화성암류와 Taylor에 의한 세계전역의 현무암, 안산암과 화강암의 미량성분 원소의 평균값 및 지각에서의 미량 성분 원소의 평균값 (Taylor, 1964)과의 비교는 Table 3-2와 같다.

SiO₂ 함량에 따른 미량원소의 변화도(Fig. 3-6)에서 보면 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 루비듐(Rb)과 질코니움(Zr)은 증가하는 경향을 보이거나 바나듐(V), 코발트(Co), 리튬(Li) 및 스트론튬(Sr)은 감소하고 바륨(Ba), 구리(Cu), 아연(Zn), 이트륨(Y), 스칸디움(Sc) 등은 상관관계를 보이지 않는 불규칙적인 분포 경향을 보여준다. Rb와 Sr의 관계는 Sr이 증가함에 따라 Rb은 감소하는데 (Fig. 3-7), 이것은 주성분 원소에서 Ca과 K의 관계와 유사하며, Rb과 K, Sr과 Ca이 서로 잘 치환될 수 있음을 나타내고 있다. Sr과 CaO의 관계도(Fig. 3-8)에서 CaO가 증가함에 따라 Sr이 증가하는데, 이는 Condie(1969)에 의한 대륙 및 호상열도의 지구조환경에서 형성된 화강암질암류가 보이는 일반적인 경향과 일치한다.

K₂O와 Rb, K₂O와 Sr, K₂O와 Ba의 관계도(Fig. 3-9)에서 Rb 및 Ba가 증가함에 따라 K₂O가 증가하는 정(+)의 상관관계를 보여주는 것으로 보아 Rb 및 Ba은 K의 원소와 잘 치환됨을 알 수 있다. K₂O와 Sr의 관계는 Sr이 증가함에 따라 K₂O가 일정함을 보여준다.

각 미량성분 원소들의 암석화학적 성질과 암석 및 광물의 분배에 대한 특징은 다음과 같다.

Table 3-2. Contents of the trace elements in the igneous rocks
in the Mt. Mudeung area.

	Kmgr-1	Kmgr-2	Kmgr-3	Kmgr-4	Kmgr-5	Kmgr-6
(ppm)						
Sr	302.70	340.60	95.80	94.40	177.30	176.00
Ba	767.00	808.60	770.30	807.60	841.50	856.10
Li	7.50	8.03	23.80	20.05	7.64	7.42
Sc	12.89	12.30	1.11	3.38	2.70	3.62
V	73.59	77.04	11.79	11.17	10.22	8.60
Cr	87.16	78.56	82.01	63.57	63.29	87.09
Co	11.21	11.16	1.98	1.71	2.23	2.35
Ni	26.34	23.65	21.33	15.99	15.29	22.54
Cu	18.63	14.92	6.19	3.95	4.88	4.97
Zn	136.2	109.30	184.50	111.20	109.10	172.50
Rb	97.70	98.30	290.60	309.30	211.40	295.80
Y	24.46	23.04	21.60	22.72	21.53	24.78
Zr	72.35	53.61	105.93	89.65	93.77	94.05
Mo	5.10	3.15	2.69	2.10	2.20	2.20
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	1.72	1.80	1.27	1.24	0.71	0.71
La	29.04	30.73	37.87	42.04	43.83	47.50
Ce	94.09	61.65	169.41	161.74	153.59	163.76
Pr	6.73	6.87	7.80	8.31	8.49	9.21
Nd	24.99	25.72	26.32	27.76	28.40	31.08
Sm	4.86	4.87	4.56	4.64	4.75	5.19
Eu	0.70	0.78	0.39	0.40	0.41	0.44
Gd	3.63	3.78	2.57	2.69	2.76	3.14
Tb	0.59	0.57	0.51	0.52	0.52	0.59
Dy	3.68	3.53	3.33	3.29	3.12	3.54
Ho	0.71	0.69	0.67	0.65	0.62	0.70
Er	2.02	1.99	2.01	2.02	1.87	2.07
Tm	0.29	0.28	0.31	0.31	0.29	0.31
Yb	1.90	1.79	2.15	2.13	1.98	2.13
Lu	0.27	0.26	0.32	0.32	0.30	0.31
Pb	10.91	10.86	12.67	11.37	12.37	12.10
Th	10.76	10.45	17.51	18.00	16.48	17.88
U	1.50	3.45	2.25	2.28	2.29	2.34

Table 3-2. Continued.

	Kmgr-7	Kmgr-8	Qp-1	Qp-2	Da-1	Da-2
(ppm)						
Sr	148.50	144.30	369.40	346.80	370.90	361.90
Ba	967.80	951.90	1350.00	1107.20	767.60	806.40
Li	7.28	7.40	17.98	18.26	14.92	13.86
Sc	3.59	3.72	6.38	2.73	8.77	7.84
V	14.19	15.23	36.88	35.66	64.85	61.19
Cr	40.53	58.61	76.34	72.50	140.87	177.81
Co	3.78	2.70	5.01	5.02	7.83	6.97
Ni	9.22	16.50	22.13	20.18	36.51	38.05
Cu	7.88	4.42	9.24	8.15	11.34	11.65
Zn	23.60	115.90	151.20	134.50	192.20	176.80
Rb	139.10	137.00	147.60	91.00	105.50	104.70
Y	20.50	19.26	19.80	12.11	21.10	19.38
Zr	85.53	64.60	65.79	62.77	82.80	104.76
Mo	1.42	2.18	2.63	2.41	6.67	7.17
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	0.57	0.57	1.37	1.13	1.87	1.72
La	43.56	41.34	51.06	36.75	36.98	35.54
Ce	145.66	77.16	174.53	73.30	72.04	68.57
Pr	8.27	7.87	9.99	7.66	7.76	7.31
Nd	28.05	26.67	34.44	27.21	28.07	25.66
Sm	4.55	4.39	5.57	4.42	4.88	4.41
Eu	0.48	0.48	0.82	0.67	0.88	0.85
Gd	2.74	3.02	3.26	2.94	3.65	3.22
Tb	0.49	0.47	0.55	0.43	0.54	0.49
Dy	3.02	2.93	3.25	2.56	3.29	3.00
Ho	0.58	0.57	0.61	0.47	0.64	0.60
Er	1.76	1.70	1.73	1.32	1.87	1.75
Tm	0.26	0.25	0.24	0.18	0.26	0.26
Yb	1.76	1.68	1.56	1.14	1.83	1.72
Lu	0.27	0.25	0.23	0.17	0.27	0.26
Pb	9.40	9.31	13.90	12.84	13.32	13.50
Th	15.29	14.51	12.98	8.52	10.18	10.58
U	1.83	1.75	1.54	1.25	1.81	1.86

Table 3-2. Continued.

	Da-4	Da-5	Da-6	An-1	An-2	An-3
(ppm)						
Sr	541.20	565.80	592.80	742.60	674.10	619.90
Ba	776.00	653.40	690.00	667.60	692.60	870.50
Li	20.66	14.55	14.23	37.79	37.47	50.28
Sc	9.91	9.56	9.84	16.91	16.36	19.05
V	69.69	63.14	64.49	150.42	137.07	82.82
Cr	140.76	214.73	138.23	109.16	73.75	99.80
Co	9.13	10.66	9.81	21.64	21.62	23.45
Ni	36.96	58.29	34.00	48.91	40.25	42.22
Cu	35.83	18.92	14.13	20.42	28.76	28.43
Zn	104.80	389.60	127.70	270.80	114.70	250.00
Rb	53.10	43.00	51.90	99.70	94.50	75.90
Y	19.93	18.19	18.95	21.10	20.22	22.48
Zr	93.73	78.08	81.05	184.64	175.52	139.33
Mo	4.68	6.01	4.28	2.37	2.20	0.00
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cs	0.58	0.37	0.44	1.27	1.24	1.79
La	36.03	34.76	37.05	26.13	24.42	31.84
Ce	69.72	68.06	69.56	53.98	50.78	65.65
Pr	7.57	7.40	7.70	6.37	6.08	7.79
Nd	28.05	27.70	28.52	25.26	24.13	31.47
Sm	4.94	4.78	4.86	4.83	4.64	5.74
Eu	1.13	1.28	1.32	1.15	1.12	1.30
Gd	3.70	3.62	3.62	3.81	3.64	4.38
Tb	0.54	0.51	0.54	0.56	0.55	0.64
Dy	3.23	3.06	3.13	3.45	3.36	3.79
Ho	0.63	0.60	0.61	0.68	0.66	0.72
Er	1.74	1.66	1.72	1.96	1.88	2.05
Tm	0.24	0.23	0.24	0.27	0.26	0.28
Yb	1.57	1.55	1.60	1.78	1.73	1.83
Lu	0.24	0.23	0.24	0.26	0.26	0.27
Pb	10.89	15.11	14.04	8.12	6.43	6.57
Th	7.66	6.76	7.17	5.10	4.70	4.00
U	1.31	1.12	1.25	0.90	0.86	0.69

Table 3-3. The comparison of trace element abundances between the study area, average for th Earth crust, the three common rocks and the average of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in the southern Korea.(ppm)

elements	range*	average*	SK**	crust	granites	diorites	basalts
Rb	43.0-309.3	135.89	124.12	90	110-210	70-100	30-50
Sr	94.4-742.6	370.00	217.04	375	440-100	450	470
Ba	653.4-1350	841.78	587.56	425	420-840	650	250
Zr	53.61-184.64	96.00	160.23	165	180	140	150
Nb			11.93	20	20	20	20
Y	12.11-24.78	20.62	30.19	33	40	30	25
Cu	3.95-35.83	14.04	15.41	55	10	40	100
Zn	23.6-389.6	159.70	63.29	70	40	75	100
Cr	40.53-214.73	100.21	17.52	100	4	20	200
Co	1.71-23.45	8.79	6.39	25	1	9	48
Ni	9.22-48.91	29.35	8.55	75	0.5	20	150
V	8.60-150.42	54.89	54.15	135	20	100	250
Sc	1.11-19.05	8.37	8.29	22	5	10	38
Li	7.28-50.28	18.28	20.91	20	38	25	15

* : study area

SK** : average of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in the southern Korea.

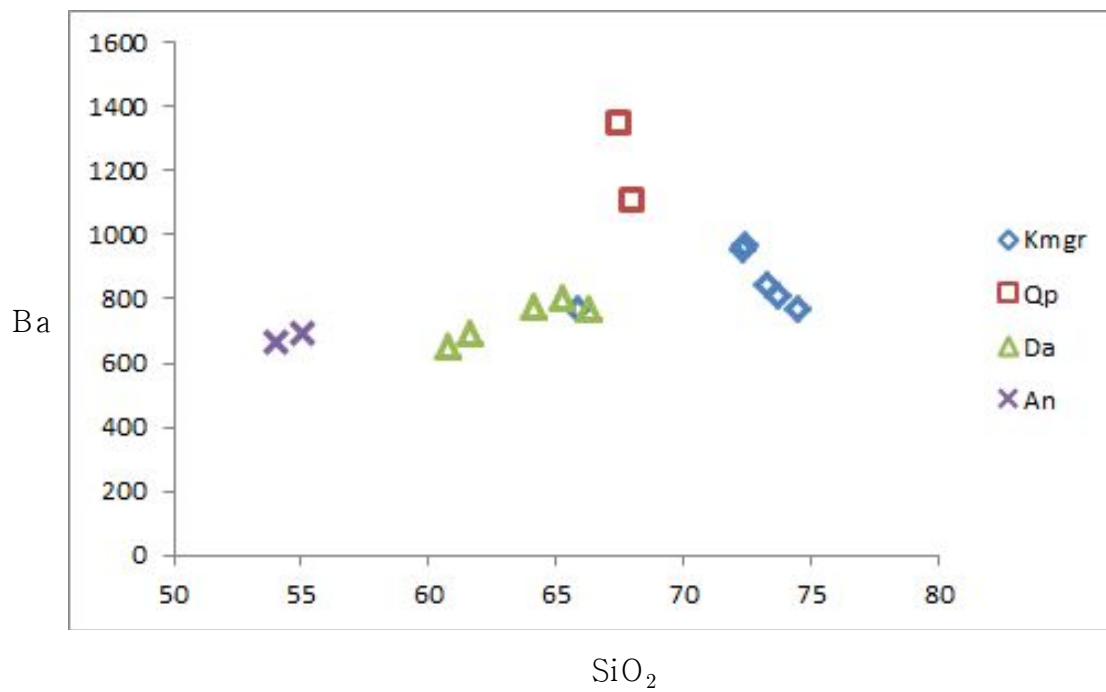
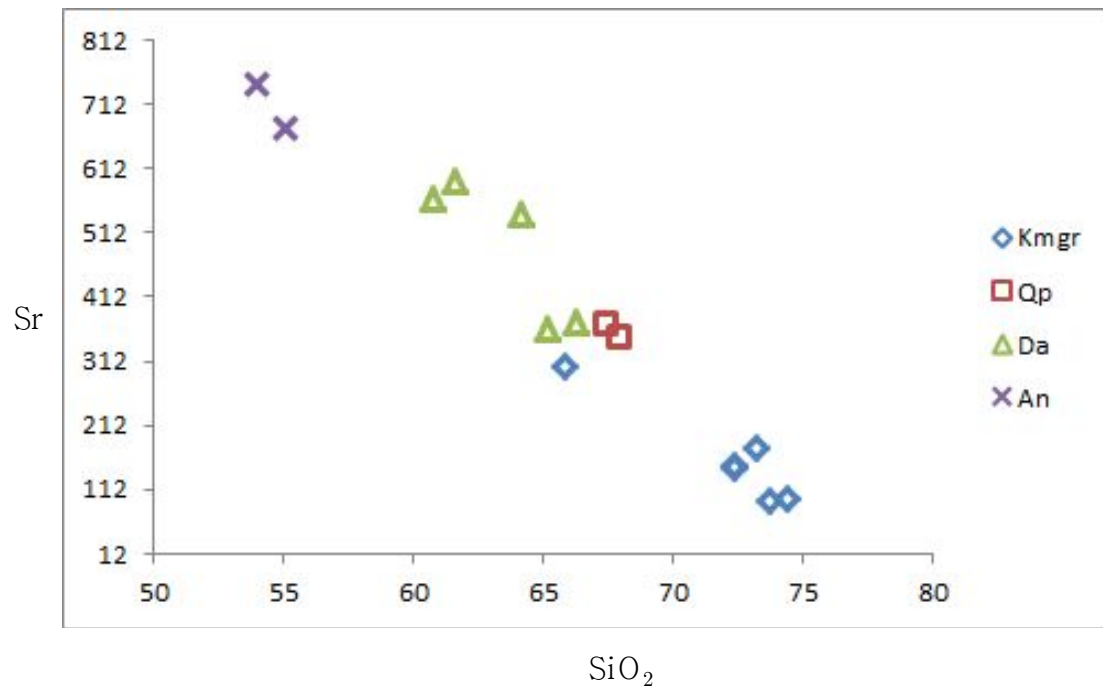


Fig. 3-6. Variation diagrams between SiO₂ and various trace elements in the igneous rocks Mt. Mudeung area.

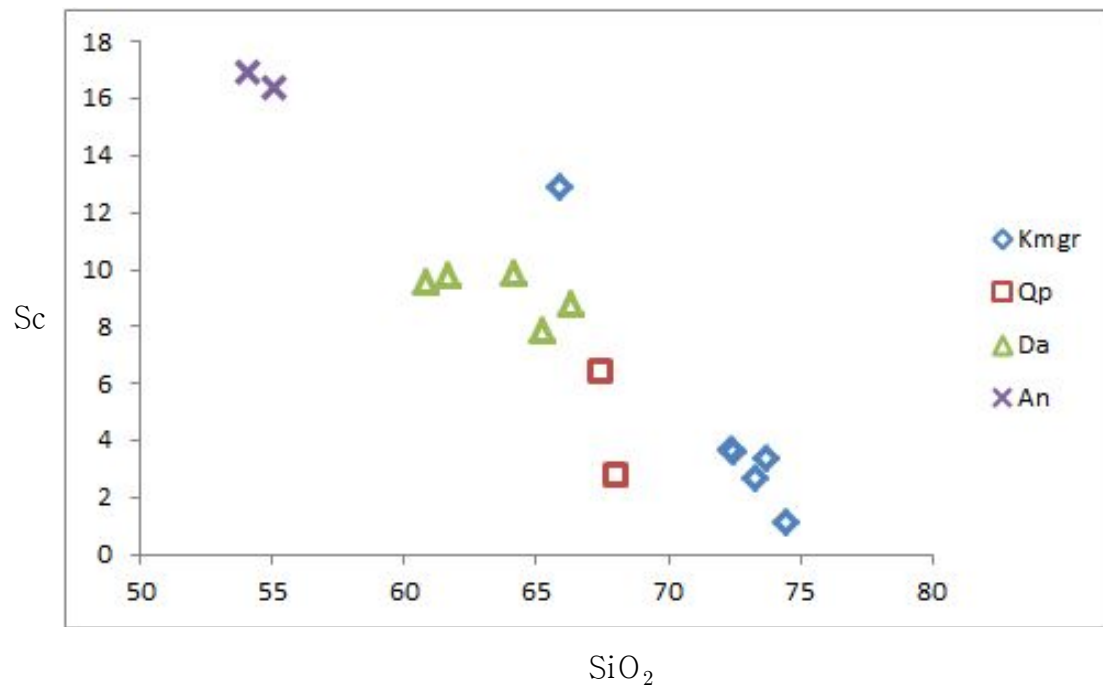
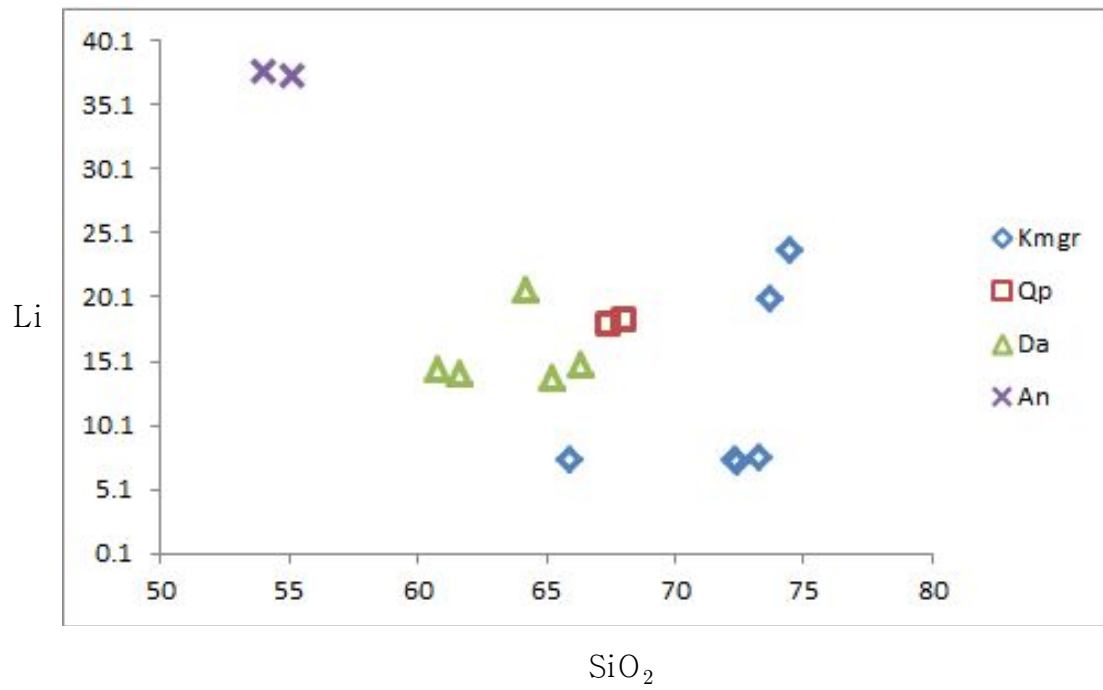


Fig. 3-6. Continued.

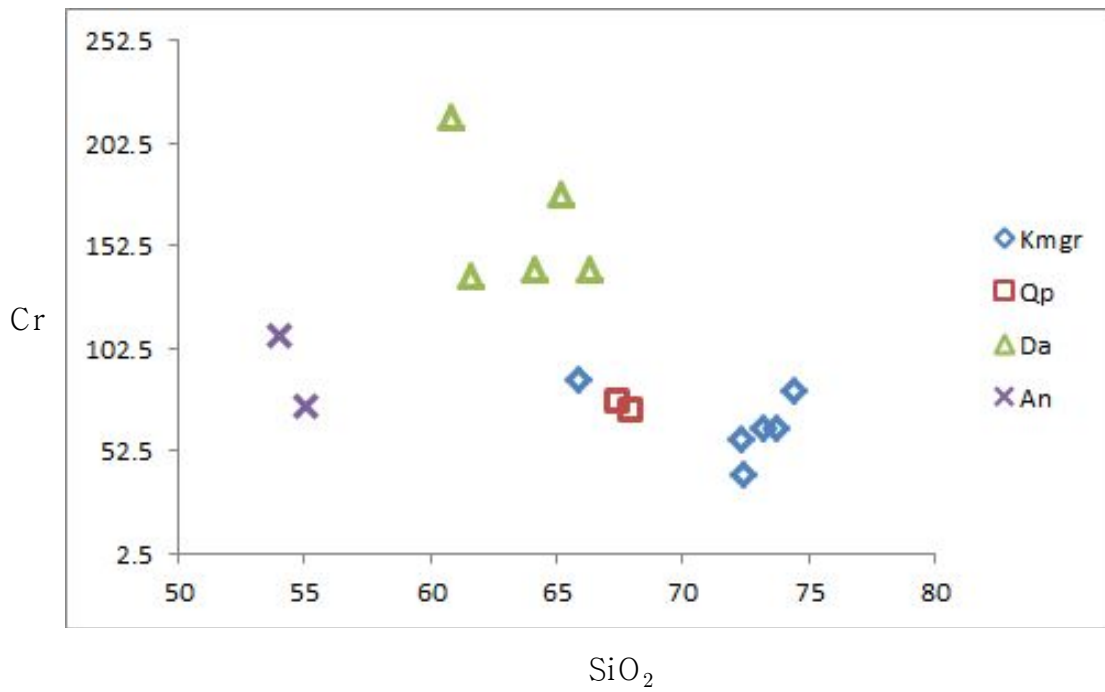
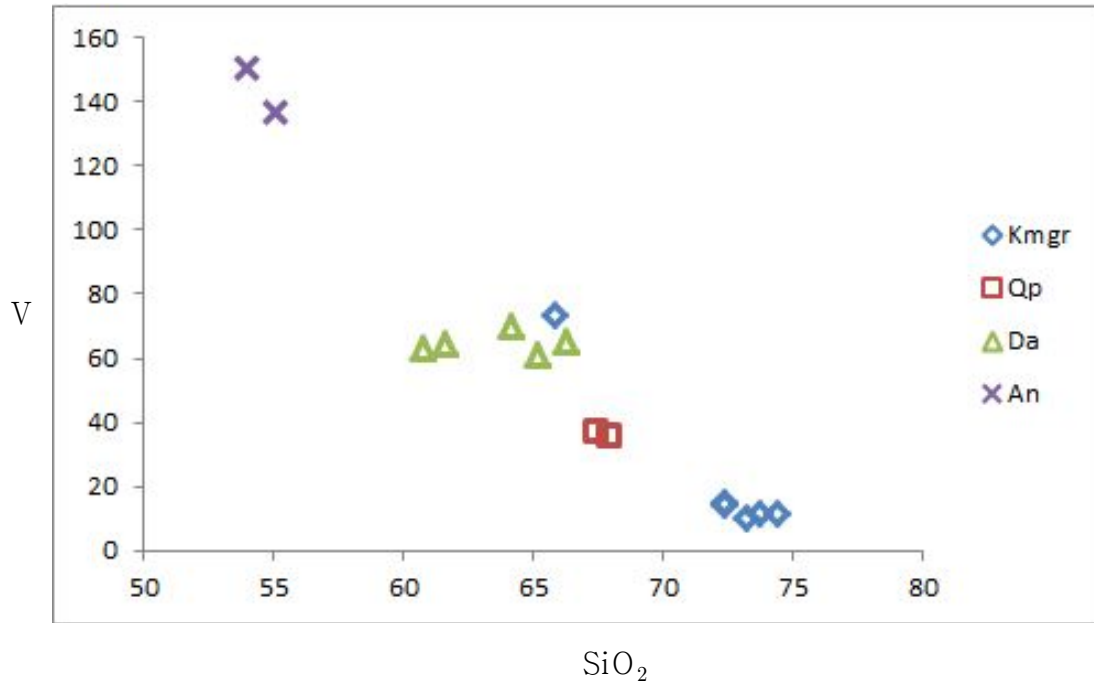


Fig. 3-6. Continued.

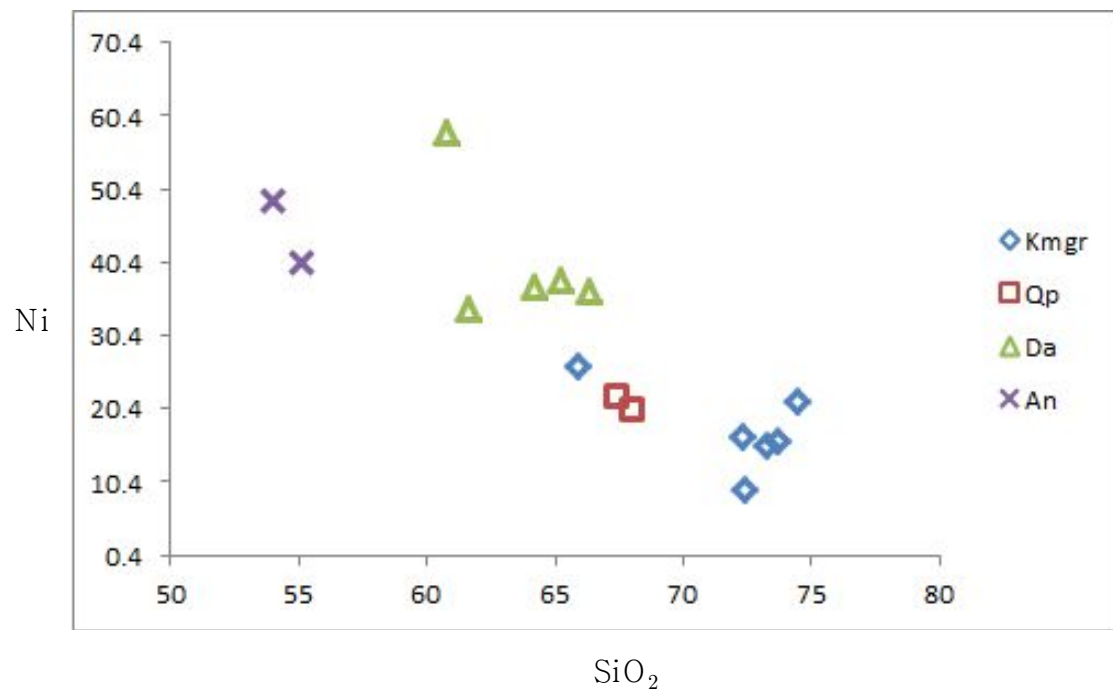
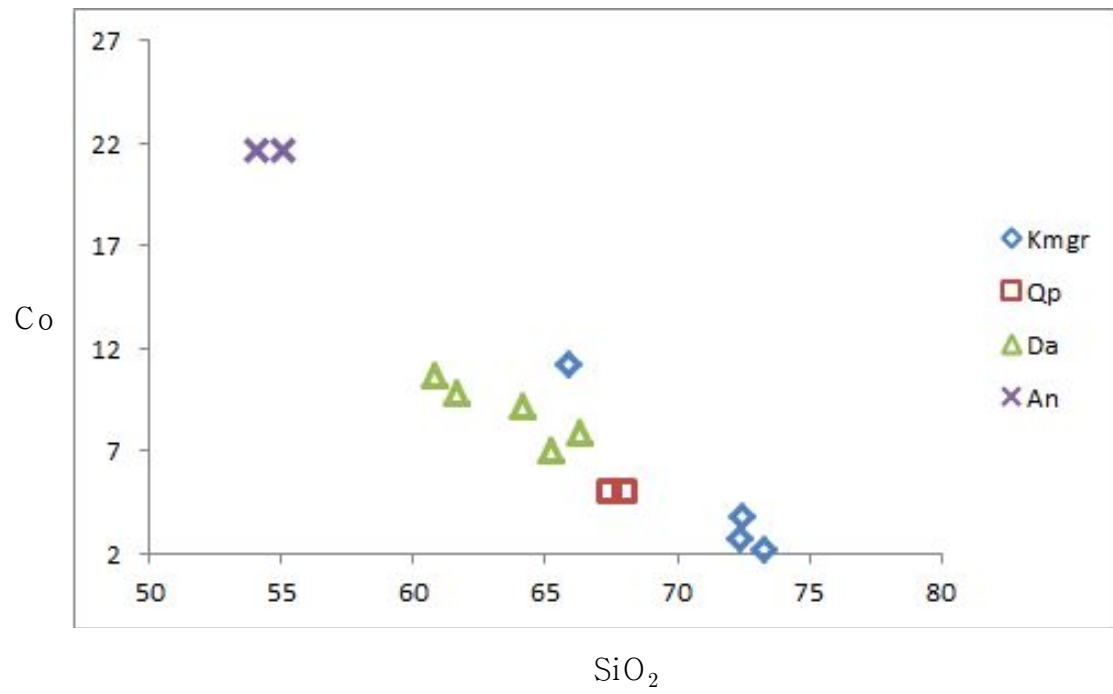


Fig. 3-6. Continued.

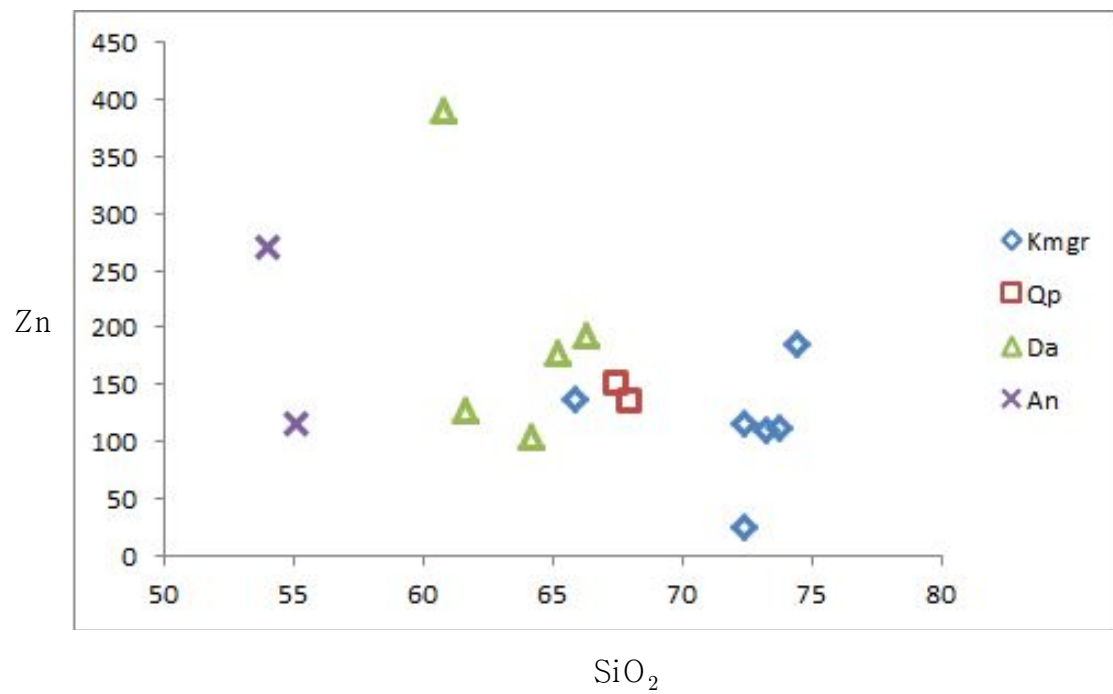
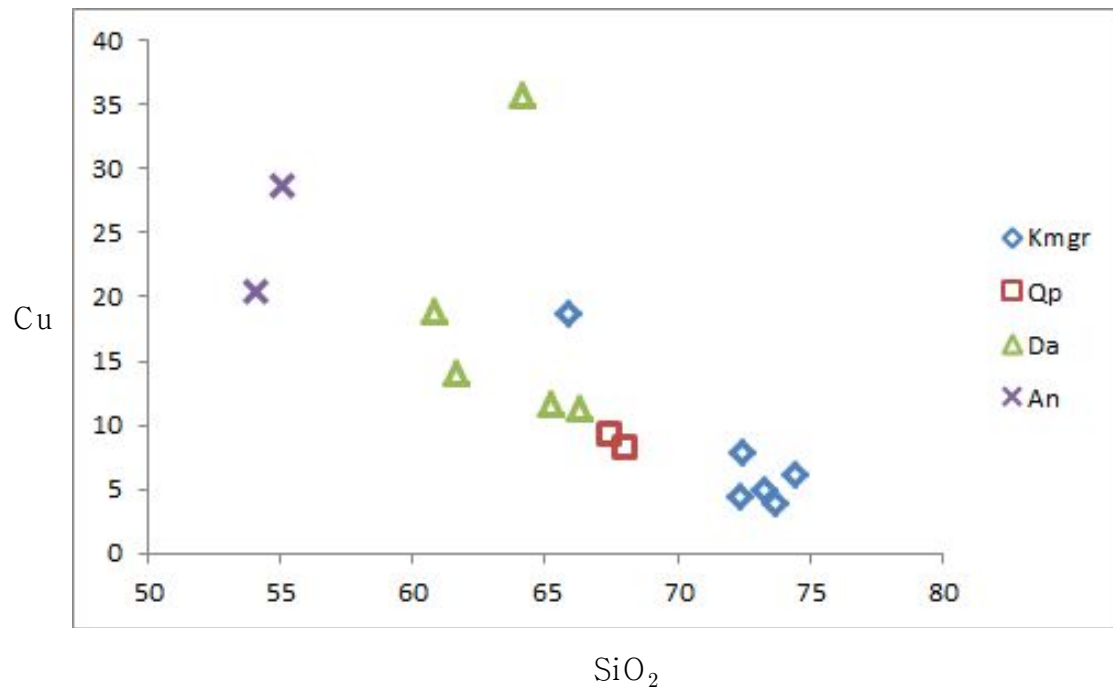


Fig. 3-6. Continued.

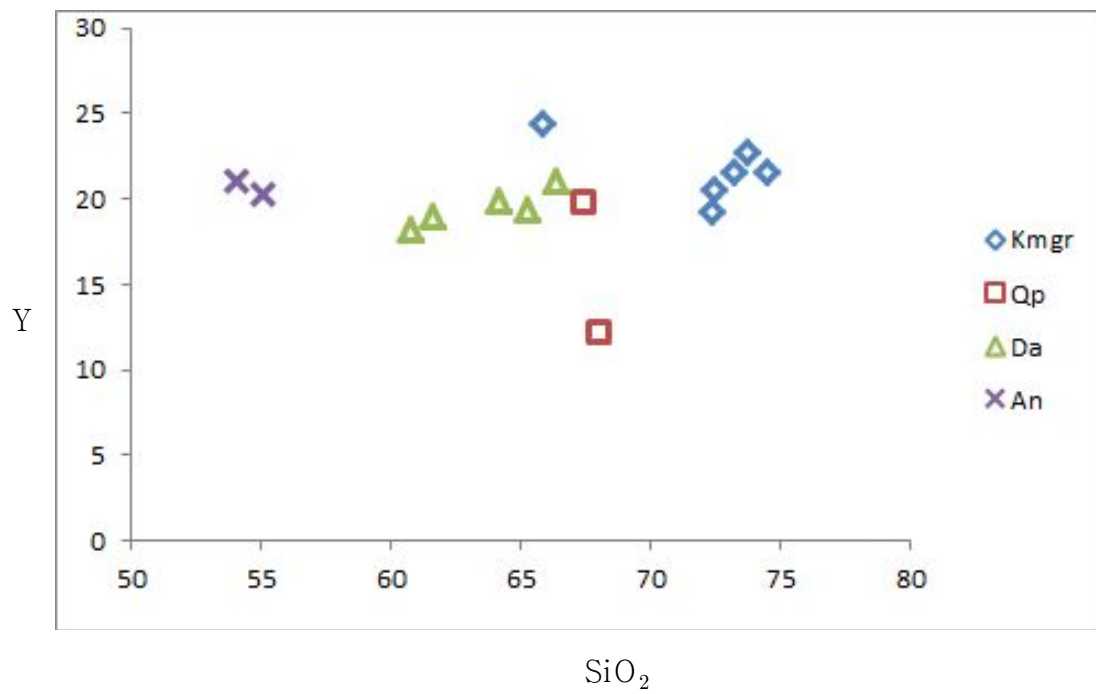
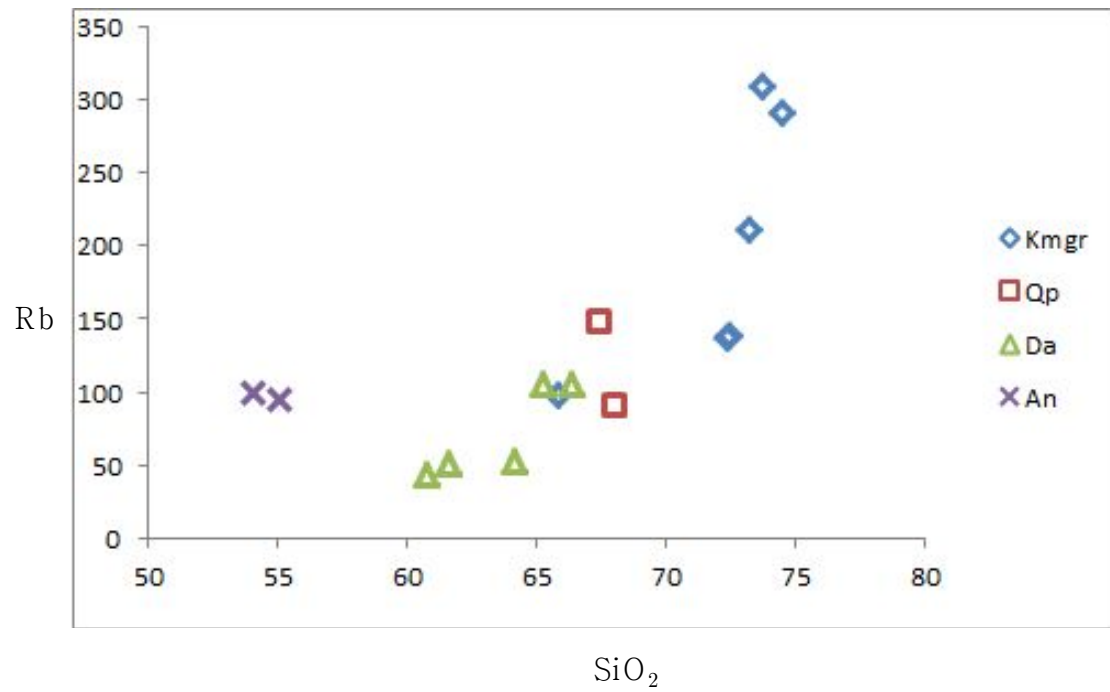


Fig. 3-6. Continued.

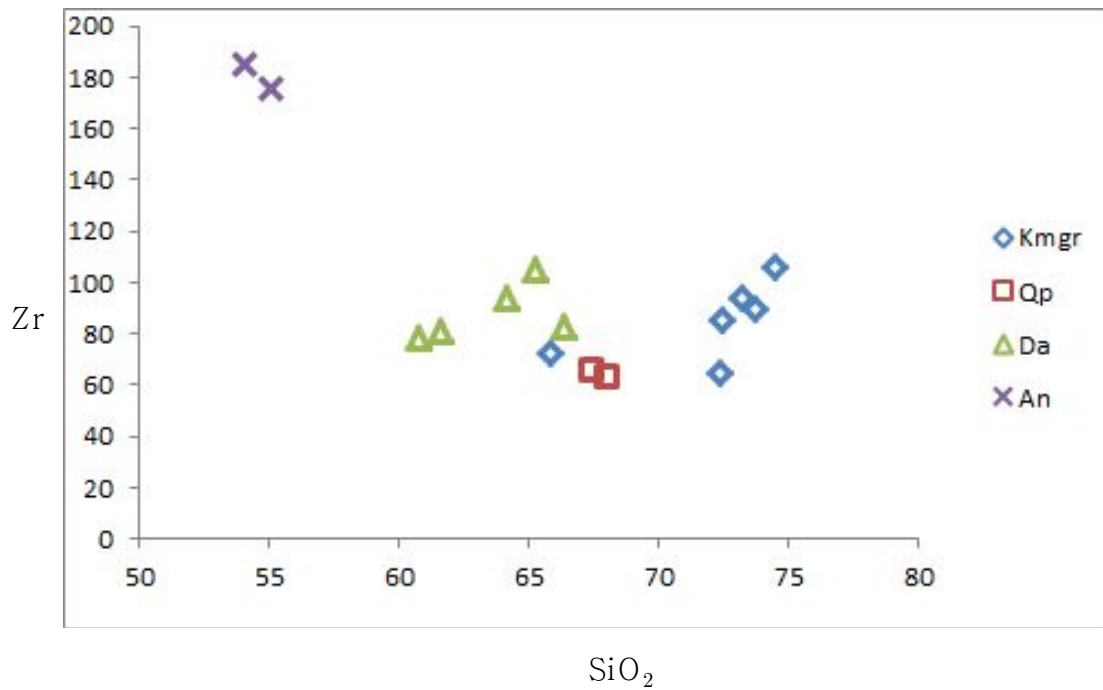


Fig. 3-6. Continued.

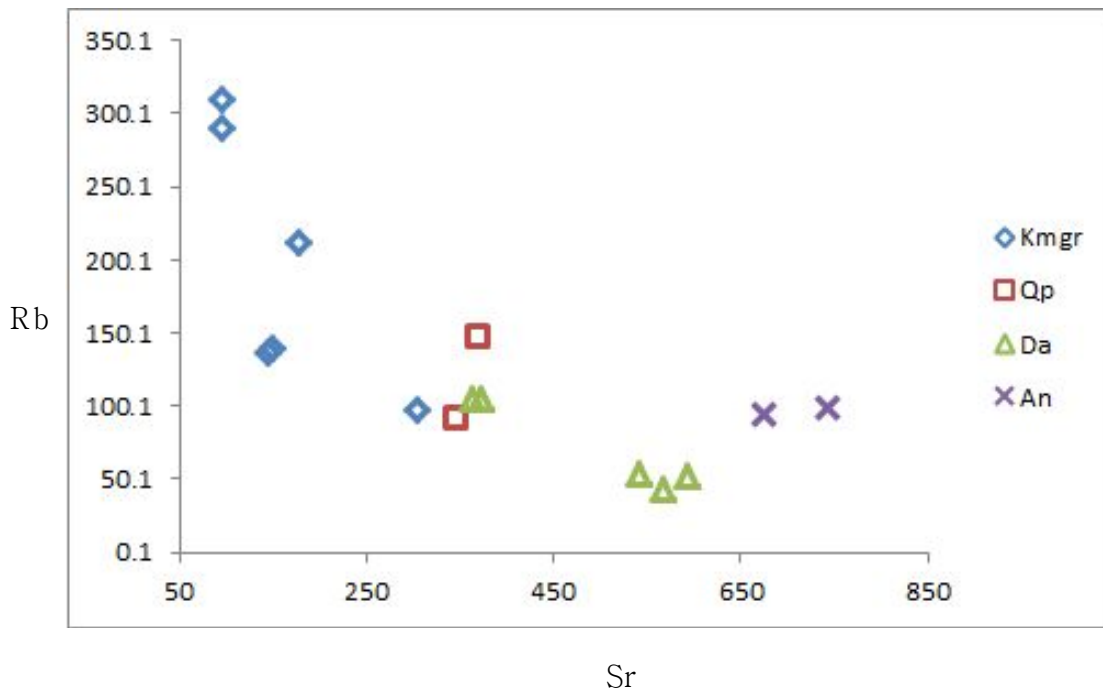


Fig. 3-7. The relationship Between Sr and Rb in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

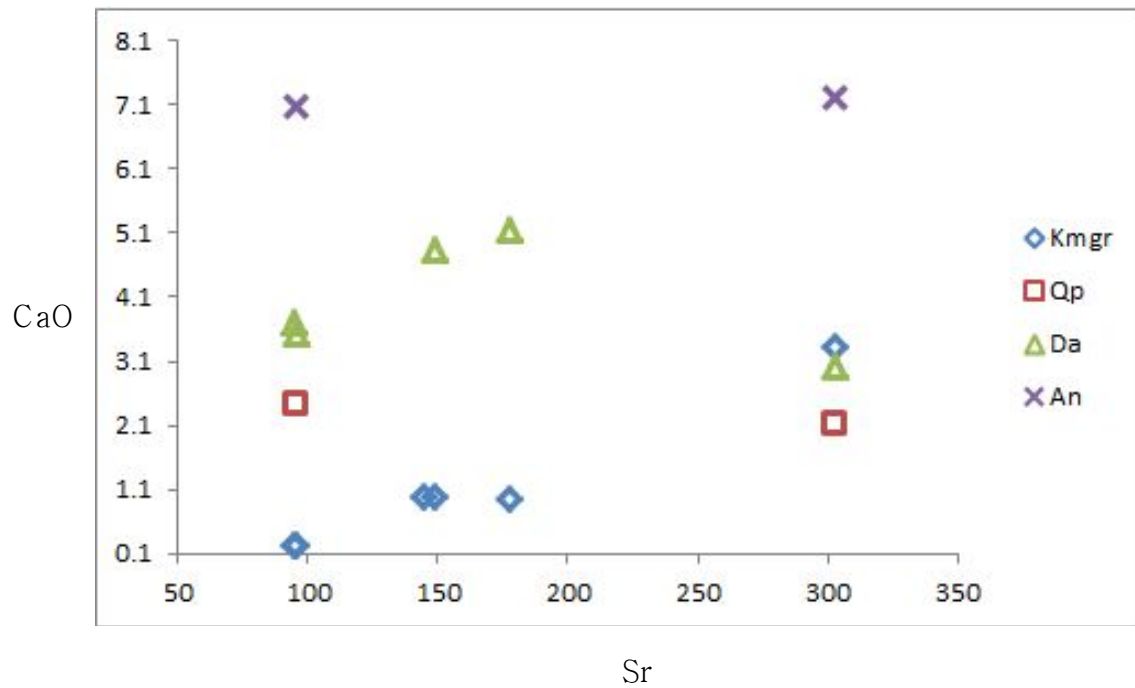


Fig. 3-8. The relationship Between CaO and Sr in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

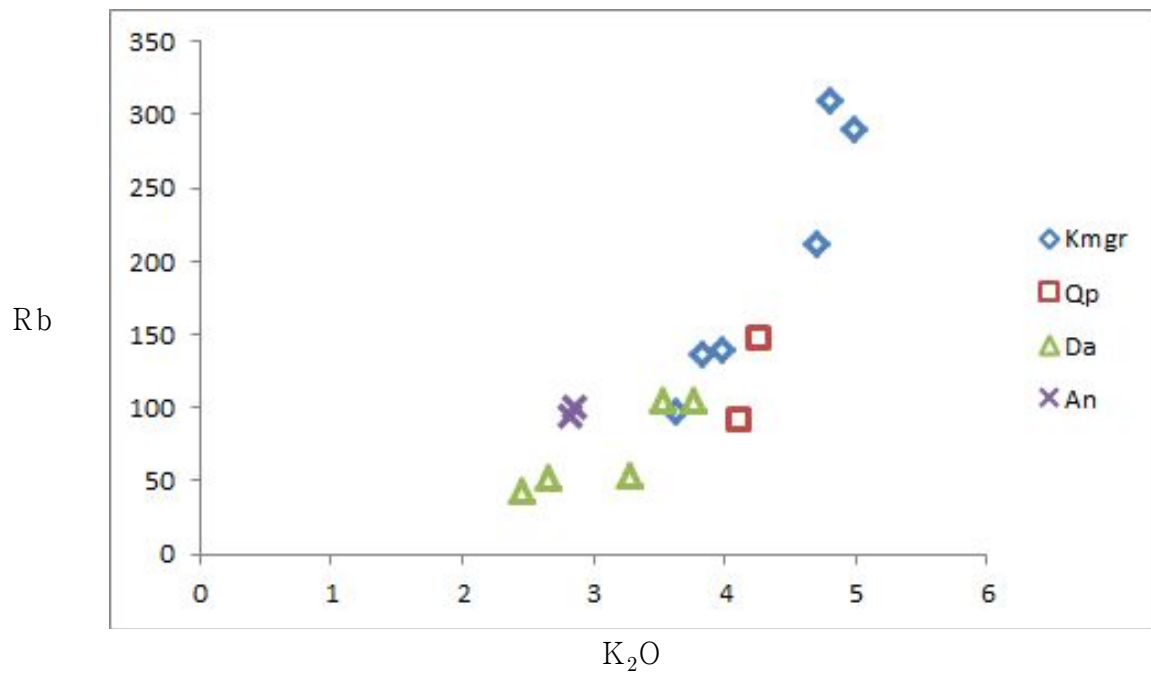
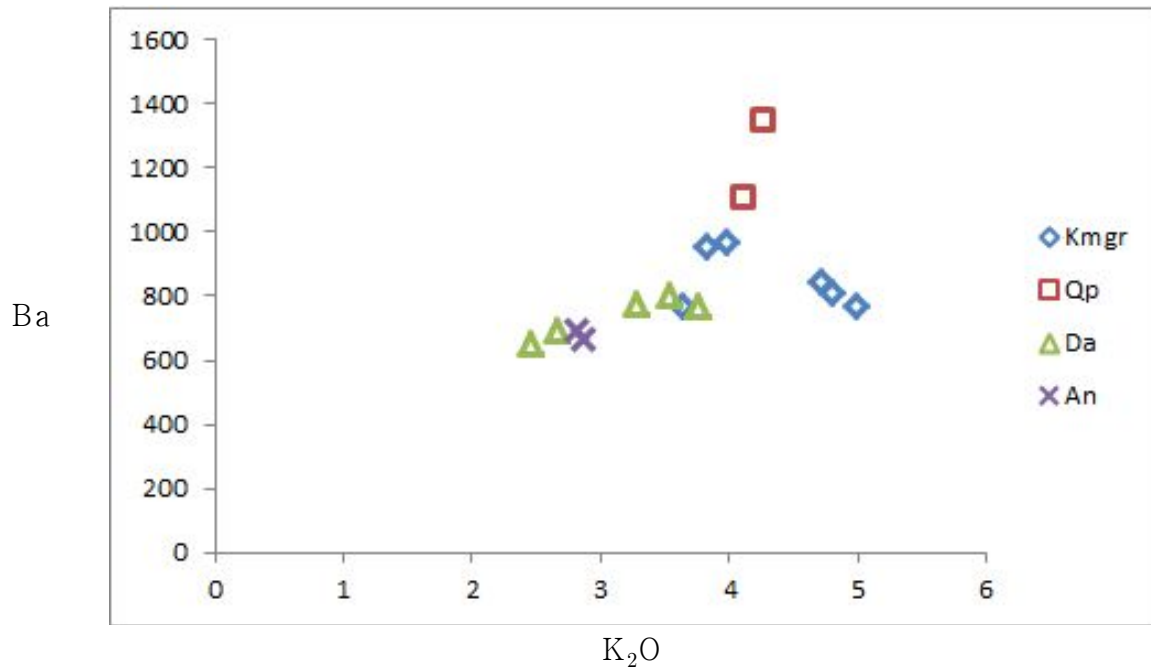


Fig. 3-9. The relationship Between K₂O and (a) Ba, (b) Rb, (c) Sr in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

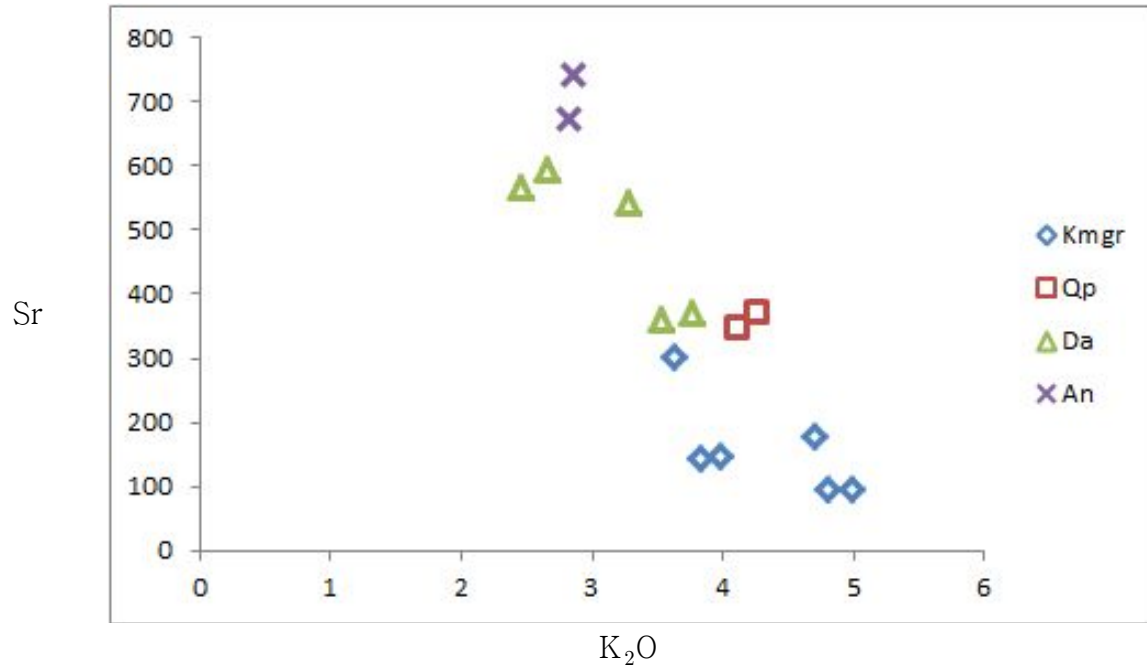


Fig. 3-9. Continued.

(1) Rubidium (Rb)

본역 화성암류의 Rb함량 분포는 43~309.3ppm(평균 135.89ppm)으로 백악기 화강암류의 평균값이나 세계의 화강암 평균값과 거의 유사하게 나타난다(Table 3-2). Rb 대 SiO_2 의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 함량이 증가함에 따라 Rb의 함량이 증가하는데, 이것은 화강암질 마그마에서 섬록암질 로부터 알카리장석 화강암질상까지의 마그마의 분화작용을 나타낸다. 또한 이것은 화강암질 마그마의 후기 분화 단계 또는 근원물질의 소량 부분용융에 기인한 것이다(Rahaman et al, 1983).

Rb은 조암광물에서 K광물, 즉 흑운모, 백운모, 미사장석, 정장석 및 lepidolite에 보통 함유되어 있으며 동원 마그마 기원의 암석계열에서는 분화가 진전됨에 따라 K/Rb비는 염기성암 (184)-중성암 (230)-산성암 (167)으로 변하는 경향을 가지는데 (Vlasov, 1966), 본역의 화성암류에서는 미문상화강암-석영반암-석영안산암-안산암 순으로 감소한다.

K_2O 와 Rb의 상관도 (Fig. 3-9)에서 Rb과 K_2O 는 정(+)의 상관관계를 가지며, Rb/Sr비는 미문상화강암이 0.29~3.28 범위로 나이지리아의 북부지역에 있는 Pan-Africa 화강암질 암류의 값(0.231~2.66)과 유사하고 (Van Breeman et al. 1977), 석영반암의 경우는 0.26~0.40, 무등산 석영안산암이 0.08~0.29, 안산암이 0.12~0.14의 범위 값을 보였고, Rb이 증가함에 따라 Rb/Sr비도 같이 증가하며, Rb과 Sr의 상관도에서는 부(-)의 상관관계를 가진다(Fig. 3-7).

2. Strontium (Sr)

본역 화성암류의 Sr 함량 분포는 94.4~742.6ppm (평균 370.0ppm)으로서, 안산암이 평균 678.9ppm으로 가장 많이 농집되어 있으며, 석영안산암이 평균 486.5 ppm으로 Taylor값보다 높았으며 석영반암이 평균 358.1 ppm으로 Taylor값에 거의 유사하였고, 미문상화강암이 평균 184.95ppm으로 가장 낮은 값을 보인다. 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치 및 화강암의 세계 평균치보다 낮다(Table. 3-3). 또한 Sr 대 SiO_2 의 관계도 (Fig. 3-6)에서 보는 바와 같이 남동 Australia의 I-type 화강암에서처럼 SiO_2 의 함량과는 양호한 부(-)의 상관관계를 보인다(Griffin et al., 1978). 이것은 화강암질마그마에서 사장석의 분별결정화 작용을 제시한다 (Dupuy and Coulon, 1973).

Sr은 이온반경(1.12 Å)과 화학적 성질이 Ca(0.99 Å)과 K(1.33 Å)의 중간에 해

당하므로 Ca^{2+} 을 가지고 있는 사장석과 같은 광물에 허용되거나 K^+ 을 가지는 K^- 장석류와 같은 광물에 포획된다(Mason and Moore, 1982).

이와 같이 Sr 함량의 분포는 Ca^{2+} 과 Sr이 잘 치환되기 때문에 Ca사장석이 풍부한 염기성암이 산성암보다 Sr 함량이 높게 나타나는 경향과 잘 일치하며(Vlasov, 1966), 또 같은 화강암류 중에서도 Ca사장석(An)의 함량이 많은 안산암에서 Sr 함량이 높게 나타난다.

CaO와 Sr의 상관도(Fig. 3-8)에서 이들이 서로 정(+)의 상관관계를 나타내는 것은 Sr이 다른 원소보다 Ca와 쉽게 치환되기 때문이다. Rb과 Sr의 관계에 있어서는 Sr이 증가함에 따라 Rb은 감소하여 부(-)의 상관관계를 나타낸다(Fig. 3-7). 따라서 K이나 Ca 이온과 치환 가능한 친석원소들 중에 Ba, Rb, Sr은 마그마 분화가 진전됨에 따라 그 상대적인 함량비가 Sr-Ba-Rb의 순으로 많아진다.

3. Barium (Ba)

본역 화성암류의 Ba 함량의 분포는 653~1350.0ppm (평균 841.78ppm)으로 남한의 백악기 화강암류나 화강암류의 세계 평균치인 Taylor값 600 ppm보다 더 높다 (Table. 3-3).

Ba 대 SiO_2 의 관계도 (Fig. 3-6)에 의하면, SiO_2 함량이 증가함에 따라 Ba의 함량이 증가하다가 SiO_2 함량이 75% 이상인 미문상화강암에서는 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 Ba의 함량은 SiO_2 를 55~75 wt,%포함하는 대부분의 암석에서 증가하는 경향을 보여준다.

Ba은 이온반경(1.36Å)이 크기 때문에 이와 비슷한 크기의 K이온(1.38Å)만을 치환하는 경향이 있어서 K_2O 가 증가하면 Ba도 증가하는 정(+)의 상관관계를 갖는다. Ba과 K_2O 의 상관도(Fig. 3-9)에서 정(+)의 관계를 가지는 까닭은 Ba과 K의 원소가 잘 치환되기 때문이다(Mason and Moore, 1982). 따라서 K_2O 와 같은 alkali성분이 많은 미문상화강암과 석영반암에 많이 농집되어 있다.

4. Vanadium (V)

본역 화성암류의 V 함량 분포는 8.60~150.42ppm (평균 54.89ppm)으로 남한의 백악기 화강암류와 거의 같고, 화강암류의 세계 평균치인 Taylor값 20ppm보다 더 높

다(Table 3-3). V 대 SiO₂의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면, SiO₂가 증가함에 따라 V은 감소하는 부(-)의 상관관계를 보인다.

V은 마그마에서 V³⁺ 이온 상태로 존재하며, 주로 자철석에 함유되어 마그마로부터 빠져 나오는데, 자철석에서 V은 Fe³⁺ 이온을 치환하지만 V³⁺ 이온의 이온반경(0.64 Å)이 Fe³⁺의 이온반경(0.65 Å)과 유사하나 전기음성도가 Fe³⁺ 이온보다 훨씬 작고, 결정장 안정화 에너지가 더 크다(Mason and Moore, 1982). 그러므로 V은 마그마 분화 초기에 가까운 안산암과 석영안산암에 풍부하게 나타난다.

5. Yttrium (Y)

본역 화성암류의 Y 함량의 분포는 12.11~24.78ppm (평균 20.62ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치보다 약간 낮은 값을 갖는다(Table. 3-3).

Y 대 SiO₂의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면, SiO₂ 함량이 증가해도 Y의 함량은 거의 변화가 없는 일정한 상관관계를 보인다.

Y은 보통 모나자이트와 같은 Ce광물, 저어콘, sphene, 인회석, 흑운모 및 자철석 등과 같이 공생하여 산출되며, 염기성암에서 산성암으로 갈수록 Y의 양이 규칙적으로 증가하는 경향이 있다(Vlasov, 1966). 이는 마그마 분화과정에서 Y이 후기에 농집될 때 후기의 산성용액에 Ca²⁺이온이 부족하기 때문에 Y이 독립된 광물로 산출될 수 있다. Y은 보통 인회석, sphene 및 석류석에 함유되어 있다.

6. Zinc (Zn)

본역 화성암류의 Zn 함량 분포는 23.6~389.6ppm (평균 159.7ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치보다 상당히 높은 값을 갖는다(Table. 3-3).

Zn 대 SiO₂의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 Zn의 함량은 대체로 감소하는 경향을 보인다.

7. Copper (Cu)

본역 화성암류의 Cu 함량의 분포는 3.95~35.83ppm (평균 14.04ppm)으로 이는

남한의 백악기 화강암의 평균값과 비슷하며 화강암의 세계 평균치보다 약간 높다 (Table. 3-3).

Cu 대 SiO_2 의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 함량이 증가함에 따라 Cu는 감소하는 부(-)의 상관관계를 보인다.

Cu는 본역의 안산암에 비교적 많이 농집되어 있으며, 석영안산암-미문상화강암-석영반암 순으로 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 3-6).

Wagner and Michell (1951)은 염기성마그마의 초기결정단계에서 Cu가 마그마로부터 유리되어 규산염 광물에는 들어갈 수 없다고 하였다.

Cu^+ 이온반경은 0.96\AA 으로 사장석의 Na^+ (이온반경 0.98\AA)이온에 위장되고, Cu^+ 및 Cu^{2+} (이온반경 0.72\AA)이온은 철-마그네슘 광물의 Fe^{2+} (이온반경 0.74\AA)이온에 위장된다.

이와 같이 Cu^+ 와 Cu^{2+} 의 이온반경이 Na^+ 와 Fe^{2+} 의 이온반경보다 작고, Cu^+ 및 Cu^{2+} 의 전기음성도가 Na^+ 와 Fe^{2+} 의 이온반경보다 작으며, Cu^+ 및 Cu^{2+} 의 전기음성도보다 크기 때문에 Cu-O의 결합력이 작아 Cu가 규산염광물에 쉽게 들어가지 못하고 잔류마그마에 농집되어 향동석이 형성될 수도 있다 (Ringwood, 1955).

8. Lithium (Li)

본역 화성암류의 Li 함량의 분포는 $7.28\sim 50.28\text{ppm}$ (평균 18.28ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치에 비슷하다(Table. 3-3).

Li 대 SiO_2 의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 함량이 증가함에 따라 Li은 약간 감소하는 부(-)의 상관관계를 보이나 미문상화강암에서는 SiO_2 함량이 73.7%이상에서는 약간 증가하는 정(+)의 상관관계를 보인다. 이와 같은 특징은 높게 분화된 암석에서 나타난다.

관입 화성암체가 동원마그마 계열일 때에는 염기성암에서 산성암으로 갈수록 Li의 함량이 점차적으로 증가하는 경향을 가지나(Vlasov, 1966), 본역의 화강암류에서는 이러한 경향이 나타나지 않는다. Li의 주요운반자(Carrier)는 흑운모로서 Li은 흑운모 내에서 Mg^{2+} 와 같이 결합되어 있으며 흑운모에 Li이 많이 들어있는 까닭은 그 결정구조와 Li이 비교적 마그마 분화의 후기에 침전되기 때문이다 (Mason and Moore, 1982). 이밖에 미사장석, 정장석에도 소량의 Li이 함유되어 있다.

마그마가 분화되는 과정에서 Li은 휘석, 각섬석 및 흑운모와 같은 광물에 소량 함유되며 분화 후기에는 Mg^{2+} 와 Fe^{2+} 이 감소하므로 화강암질암류에서는 lepidolite, spodumene, amblygonite 및 petalite와 같은 Li광물을 형성하게되나 (Mason and Moore, 1982). 무등산 지역 화성암류 에서는 이러한 Li광물이 발견되지 않는다.

9. Zirconium (Zr)

본역 화성암류의 Zr 함량의 분포는 53.61~184.64ppm (평균 96ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치보다 낮은 분포를 보인다 (Table. 3-3).

Zr 대 SiO_2 의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 함량이 증가함에 따라 Zr의 함량이 증가하는 정(+)의 상관관계를 보인다.

이와 같은 거동은 calc-alkaline의 중생대 화성암지역인 Antarctic반도와 미국의 Andean Cordillera지역에서처럼 Zr의 분별 결정작용의 특성과 일치한다(Tarney and Saunders, 1979).

한편, 마그마 분화가 진전됨에 따라 Zr함량은 점차 더 증가하는 경향을 가진다. 동원마그마 기원의 화성암류에서는 염기성암에서 산성암으로 갈수록 Zr의 함량이 증가하는 경향을 가지며, 암석의 조암광물 및 수반 광물에 있어서 Zr은 보통휘석, 각섬석과 같은 Fe-광물에 다소 함유되어 있고, 운모류에는 거의 들어있지 않다. 또 자철석, illmenite, 금홍석 및 sphene과 같은 수반광물에 흔히 나타나며, 석영이나 장석류와 같은 무색광물에는 아주 소량 함유되어 있는데(Vlasov, 1966), 본역의 화성암류에서도 자철석, sphene 및 저어콘이 수반된 미문상화강암에서 Zr의 함량이 비교적 높다.

10. Cobalt (Co)

본역 화성암류의 Co 함량의 분포는 1.71~23.45ppm (평균 8.79ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치보다 높은 분포를 보인다 (Table. 3-3).

Co 와 SiO_2 의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 함량이 증가함에 따라 V은 감소

하는 부(-)의 상관관계를 가지는데, 이는 다른 calc-alkaline지역과 오스트레일리아 남동쪽의 I-type 화강암류와 비슷하다(Collins et al., 1982).

Co^{2+} 의 크기 (0.74 Å)는 Fe^{2+} 이온(0.77 Å)과 거의 같으므로 Co^{2+} 는 Fe^{2+} 화합물 속에 위장되어 들어간다. 그러나 Co 대 Fe의 비율은 마그마 분화 초기의 광물에서 가장크고 분별 작용이 진행됨에 따라 점차 감소하는 경향이 있다(Mason and Moore, 1982).

Nockolds and Allen (1954)에 의하면 Co의 실효 반지름은 오히려 Mg의 반지름과 비슷하여 각 계열에서 Co : Mg의 비가 일정함을 밝혔다. 그러므로 마그마속에 들어있는 대부분의 Co는 초기에 생성된 Mg광물, 특히 감람석에 함유되어 마그마로부터 분리된다. Co는 SiO_2 와의 상관도(Fig. 3-6)에서 아주 뚜렷한 부(-)의 상관관계를 보여주고 있는데 이것은 Co가 마그마의 결정작용이 이루어지는 동안 Fe^{2+} 의 소모와 함께 Mg^{2+} 과 Fe^{2+} 위치에 들어가려고 하는 화학적 성질에 기인한다(Ringwood, 1955).

11. Scandium (Sc)

본역 화성암류의 Sc 함량의 분포는 1.11~19.05ppm (평균 8.37ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치와 비슷한 분포를 보인다(Table. 3-3).

Sc과 SiO_2 의 관계도 (Fig. 3-6)에 의하면 SiO_2 가 증가함에 따라 대체로 감소하는 경향이 있다.

Sc은 마그마가 냉각결정화 됨에 따라 초기에 형성되는 휘석, 각섬석 및 흑운모와 같은 철-마그네슘 광물에 주로 농집되기 때문에(Ringwood, 1955) 염기성암과 같은 분화 초기에 형성된 암석에 많이 함유되어 있다.

화강암질암류에서 Sc의 함량은 illmenite가 많을수록 감소하고 흑운모, 각섬석, 백운모 및 sphene에 수반되어 산출되고, 특히 흑운모가 많은 화강암류에서 높게 나타난다(Vlasov, 1966).

Sc^{3+} 의 이온반경(0.81 Å)이 Mg^{2+} (0.66 Å)보다 Fe^{2+} (0.74 Å)에 가까우므로 Sc^{3+} 이 Mg^{2+} 보다는 Fe^{2+} 과 함께 행동하며 잘 농집되기 때문에, Sc^{3+} 의 전기음성도($E_{\text{Sc}}=1.3$)는 Fe^{2+} ($E_{\text{Fe}}=1.65$)보다 Mg^{2+} ($E_{\text{Mg}}=1.2$)에 더 가깝다. 따라서 Sc은 Fe보다는 적당한 격자의 위치에 들어가려고 하는 경향이 더 크기 때문에 분화 초기

에 형성되는 광물에 잘 농집된다(Ringwood, 1955).

12. Nickel (Ni)

본역 화성암류의 Ni 함량의 분포는 9.22~48.91ppm (평균 29.35ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치보다 훨씬 높으며 화강암의 세계 평균치보다도 훨씬 높다(Table 3-3).

Ni 과 SiO₂의 관계도(Fig. 3-6)에 의하면 SiO₂함량이 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보인다.

Ni 이온의 반지름은 Mg 이온의 반지름과 사실상 같고 전하도 같다. 따라서 Ni 은 Mg 광물 속에 위장되어 들어가므로 마그마 초기에 생성된 광물(특히 감람석)에서 Ni 대 Mg의 비는 높으나 후기에 생성된 암석과 광물에서는 점차적으로 감소하는 경향을 보인다(Mason and Moore, 1982).

Ni²⁺의 이온반경(0.69 Å)이 Fe²⁺의 이온반경(0.74 Å)보다 작으므로 Ni은 높은 이온 결합 에너지 때문에 초기의 광물결정에 들어가려고 한다.

Fe²⁺의 전기음성도(1.65)와 Ni²⁺의 전기음성도(1.70)가 거의 유사하나 Ni-O의 결합이 Fe-O의 결합보다 더 강하므로 Ni은 비교적 마그마 분화의 초기에 형성되는 휘석, 각섬석 및 사장석(An)과 같은 광물에 농집된다(Ringwood, 1955).

13. Chromium (Cr)

본역 화성암류의 Cr 함량의 분포는 40.53~214.73ppm (평균 101.21ppm)으로 이는 남한의 백악기 화강암의 평균치와 화강암의 세계 평균치보다 훨씬 높은 값을 갖는다(Table. 3-3).

Cr과 SiO₂의 관계도 (Fig. 3-6)에 의하면 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보인다.

Cr은 마그마내에서 Cr³⁺이온으로 존재하기 때문에 초기 생성물인 chromite나 휘석에 선별 농축된다(Mason and Moore, 1982).

이와 같이 무등산지역 화성암류 중의 미량 성분 원소는 Ba, Sr, Zn, Rb과 Ce의 함량이 100ppm 이상이며 기타 원소는 100ppm 이하이다. 13개 미량성분 원소에 따르면 무등산지역 화성암류는 마그마 분화 말기의 산물로 볼 수 있다.,

제3절 희토류 원소

희토류 원소는 주기율표에서 IIIa족에 속하며, 이들 원소는 물리적, 화학적 성질이 매우 유사하다. 그러나 암석학적 또는 광물학적 과정에 따라 서로 다른 거동을 가지므로 지각 또는 맨틀의 부분용융, 분별결정작용 및 마그마의 분화와 같은 과정을 포함하는 화성암류의 분화과정을 밝히는데 매우 중요하게 이용된다(Henderson, 1984).

희토류 원소는 Lanthanum(La)에서 Samarium(Sm)까지의 원소, 즉 Light rare earth element(LREE)와 Gadolinium(Gd)에서 Lutetium(Lu)까지의 원소인 Heavy rare earth element(HREE)로 구분할 수 있다(Henderson, 1984).

본역 화강암류에 대한 희토류 원소의 분석값은 Table 3-4와 같다.

총희토류 함량에 대한 La/Yb 변화도(Fig. 3-11)는 La/Yb비가 증가함에 따라 전체 희토류 함량이 화순안산암→무등산데사이트→석영반암→미문상화강암 순으로 증가하여 분화도의 정도를 보여주며, 또 바나듐에 대한 SiO₂ 변화도(Fig. 3-6)에서도 부(-)의 기울기를 보이는 화살표는 마그마 분화 때에 자철석 분별결정작용으로 인하여 바나듐의 감소 경향을 보이는 순서로서 무등산 지역의 화산암에서 자철석 분별결정작용을 받은 순서가 화순안산암→무등산데사이트→석영반암→미문상화강암 순서임을 지시해준다.

희토류원소(Table 3-4)의 총합량(Σ REE)은 석영반암 296.6ppm, 화순안산암 136.32ppm, 무등산데사이트 157.64ppm, 그리고 미문상화강암 219.59ppm으로 백악기 화성암류가 높고 트라이아스기-쥬라기 화성암류는 낮은 값을 보인다. 또 희토류의 Eu(-) 이상을 나타내는 Eu/Sm은 각섬석-흑운모화강섬록암 0.21, 석영섬록암 0.24, 화순안산암 0.23, 무등산데사이트 0.23, 그리고 미문상화강암 0.11로 백악기 화성암류 트라이아스기-쥬라기 보다 다소 낮고, 또 다른 지역과 유사한 값을 보인다(Henderson, 1984; Hong, 1983). 또 희토류를 Nakamura(1974)의 운석에 대한 분석치로 표준화한 REE pattern에 의하면 백악기 화성암류가 트라이아스기-쥬라기 화성암류보다 비교적 낮고 뚜렷한 Eu(-) 이상값을 보인다(Fig. 3-10). 이는 대륙이나 대륙연변부에서 구조운동시 생성되는 화강암류가 보이는 특징과 일치한다. 분화가 진행됨에 따라 HREE가 LREE보다 농집되어 급한 부(-)의 경사를 보여준다. 이는 백악기 화성암류가 트라이아스기-쥬라기 화성암류보다 얼마간 분화도가 더 높았음을 지시한다.

Table 3-4. Contents of the Rare Earth Elements in the Igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

	Kmgr -5	Kmgr ave	Qp -2	Qp ave	Da -4	Da ave	An -2	An ave
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
La	43.83	39.49	36.75	43.9	36.03	36.07	24.42	27.40
Ce	153.59	128.38	73.30	123.92	69.72	69.59	50.78	56.80
Pr	8.49	7.94	7.66	8.82	7.57	7.55	6.08	6.75
Nd	28.40	27.37	27.21	30.83	28.05	27.60	24.13	26.95
Sm	4.75	4.73	4.42	5.00	4.94	4.77	4.64	5.07
Eu	0.41	5.10	0.67	0.75	1.13	1.09	1.12	1.19
Gd	2.76	3.04	2.94	3.10	3.70	3.56	3.64	3.94
Dy	3.12	3.31	2.56	2.91	3.23	3.14	3.36	3.53
Ho	0.62	0.65	0.47	0.54	0.63	0.62	0.66	0.69
Er	1.87	1.93	1.32	1.53	1.74	1.75	1.88	1.96
Yb	1.98	1.94	1.14	1.35	1.57	1.65	1.73	1.78
Lu	0.30	0.30	0.17	0.20	0.24	0.25	0.26	0.26
Σ REE	250.12	219.59	158.61	222.85	158.55	157.64	122.7	136.32
Eu/Sm	0.09	1.07	0.15	14.9	0.23	0.23	0.24	0.23
Σ LREE	239.47	208.42	150.01	286.97	147.44	146.67	110.39	124.16
Σ HREE	10.65	11.17	8.60	9.63	11.11	10.97	11.53	12.16
Σ LR/ Σ HR	22.49	18.66	17.44	29.80	13.27	13.37	9.57	10.21

Abbreviation

Σ LREE : Sum of light REE(La to Eu), Σ HREE : Sum of heavy REE(Gd to Lu), Σ LR/ Σ HR : Σ LREE/ Σ HREE.

Table 3-5. Range of REE contents in acidic and intermediate rocks. (Henderson, 1984)

Rock type	Σ REE (ppm)	(La/Lu) _{cn}	Eu/Sm
Acidic And intermediate rocks			
Continental tholeiites	15.2-322	0.5-7.6	0.16-0.55
Island arc and back-arc tholeiites	10-262	0.4-7.3	0.22-0.54
tholeiitic intrusive complexes	2.7-547	0.31-19.3	0.23-1.55
Andesite	25-341	1.0-21.5	0.15-0.51
oceanic	25-178	1.0-8.6	1.19-0.51
continental	67-341	1.5-21.5	0.15-0.35
Anorthosite	1.7-148	0.13-58	0.30-5.0
Associated			
jotunite, mangerite			
and anorthositic gabbro	34.5-312	3.4-14.9	0.34-0.73
Quartz diorite, tonalite,			
granodiorite, and trondhjemite	10.5-499	0.34-413	0.041-1.76
Those with negative Eu			
anomalies	60-499	8.9-66	0.041-0.26
Those with negative Eu			
anomalies from young			
island arcs or ophiolites	34.4-131	0.34-1.7	0.13-0.29
Those with positive Eu			
anomalies	10.5-144	5.0-77.5	0.39-1.76
Those with little or no Eu			
anomalies	12-273	2.8-413	0.24-0.38
Monzogranites and syenogranites	8-1977	0.54-137	0.0009-1.07
Those with small to moderate			
negative Eu anomalies	106-877	2.5-50	0.09-0.23
Those with moderate to large			
negative Eu anomalies	40-1977	1.1-22	0.0009-0.00 74
Those with positive Eu anomalies	40-210	4.8-97	0.41-1.07
Those with little or no Eu anomalies	8-1426	0.54-137	0.20-0.36

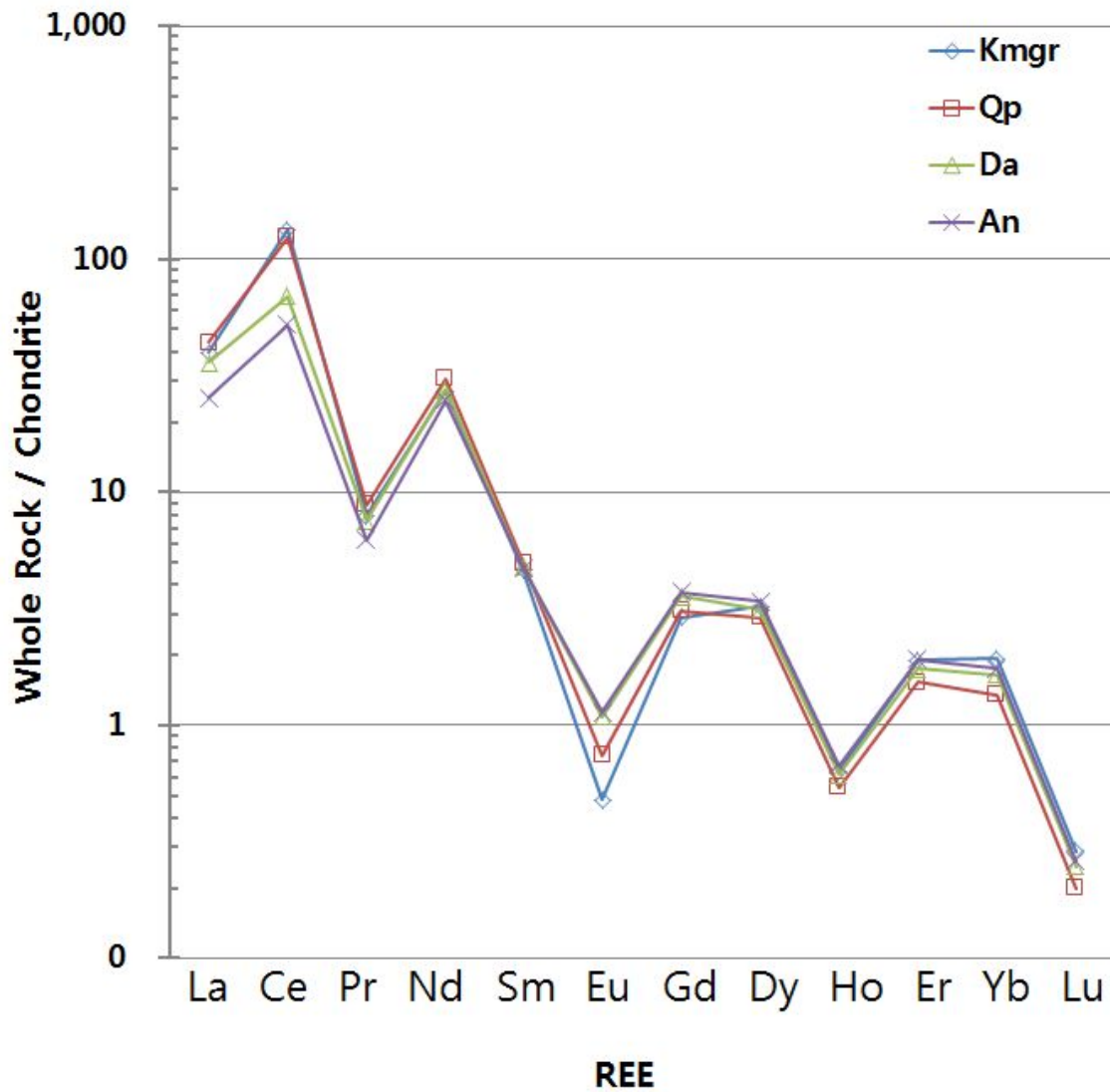


Fig. 3-10. Chondrite normalized rare earth elements(REE) patterns of igneous rocks in the Mt. Mudeung area.

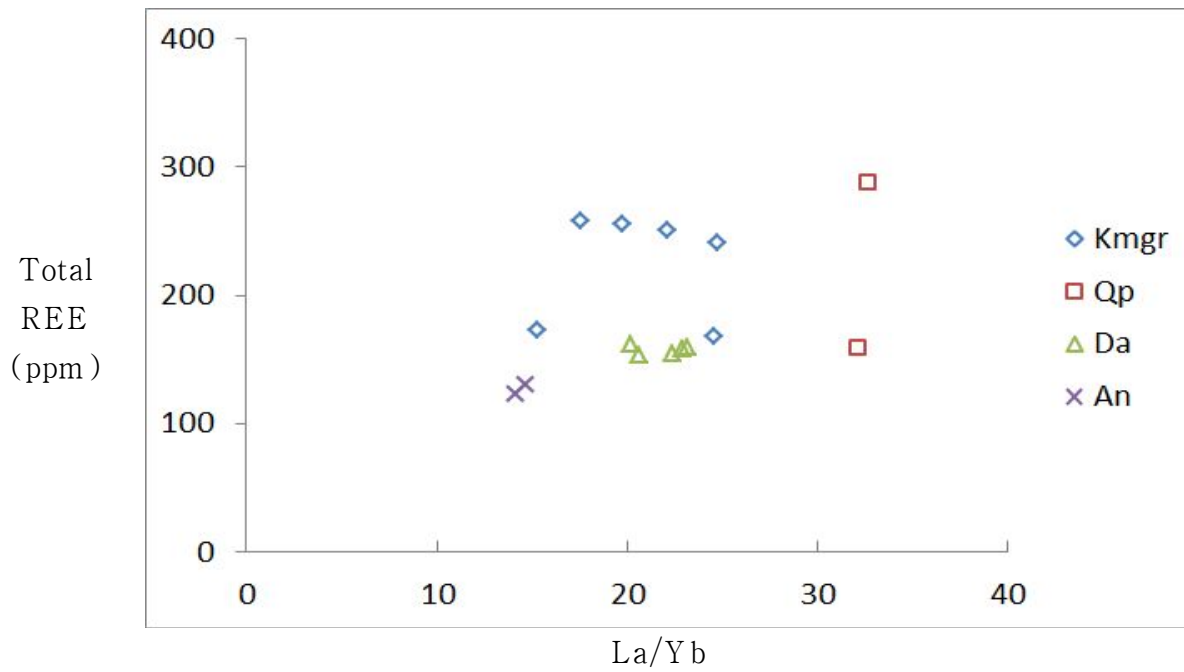


Fig. 3-11. REE variation diagram. Total REE (ppm) versus La/Yb ratio showing systematic trend on total REE from Cretaceous volcanic rocks in Mt. Mudeung area.

제4장 화성암류의 지질연대

제1절 동위원소 분석방법

동위원소분석은 한국기초과학지원연구원 오창센터의 열이온화질량분석기(TIMS, Isoprobe-T, IsotopX Co.)를 이용하여 Rb-Sr과 Sm-Nd에 대해 분석하였다. 준비된 암석분말시료 약 30mg에 혼합 스파이클(^{84}Sr - ^{87}Rb , ^{150}Nd - ^{149}Sm)를 적정량 가하고, 혼합산($\text{HF}:\text{HClO}_4:\text{HNO}_3$)를 더해 바이알의 뚜껑을 닫고 밤새 가열하였다. 다음날 바이알의 뚜껑을 열고 휘발시킨 후 2.5N HCl 0.5ml로 만들어 컬럼화학실험에 사용하였다. Rb, Sr 그리고 희토류원소포함 부분을 분리하기 위해 양이온교환칼럼화학(AG50W-X8, H^+ form, 200~400#)실험을 실시하였다. Sm과 Nd분리를 위해서는 희토류원소포함 부분을 묶은 염산과 HDEHP(Bis(2-ethylhexyl) hydrogen phosphate)를 코팅시킨 테플론 파우더(Regin)를 이용한 칼럼화학(Richard et al., 1976)을 실시하였다.

분리된 Rb과 Sr은 Ta filament에 얹어 열이온화질량분석기로 분석하였으며, Rb에 대한 동위원소비는 정적인 모드(static mode)로 분석하였으며(N=20, 5s integration) Sr은 $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.1194$ 질량분별효과를 보정하면서 동적인모드(dynamic mode)로 분석하였다(2σ , N=100, 5s intergration). 분석된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 에 반영된 스파이크 효과는 수학적으로 보정하였다. NBS987 표준물질의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 분석 평균값은 0.710254 ± 0.000004 (N = 30, 2σ SE)로, 추천치 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710250$)와 부합되었다. 분석에 따른 Sr의 배경값은 0.1ng 이하이다. 등시선의 통계적인 처리는 Ludwig(2001)를 따랐으며, 연대계산에 있어서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 오차는 내부 분석오차를 사용하였고, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 오차는 반복실험의 결과에 따라 0.5%를 주었다. 계산된 연대와 동위원소비 초기치는 95% 신뢰도(2σ)를 사용하였다.

제2절 Rb-Sr법의 결과와 해석

본역의 화성암체는 1/5만 동북도폭 (1990)에서 무등산 지역의 미문상화강암이나 석영반암은 불국사화강암류로 분류하였고 무등산석영안산암과 안산암(화순안산암)은 유천층군으로 분류하였다.

무등산 지역 미분상화강암의 Rb-Sr 전암연령은 $76.8 \pm 3.6 \text{Ma}$ 이고, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생치는 0.71067 ± 0.00023 (MSWD; 8.9)으로 백악기 말기에 해당한다(Fig. 4-1, Table 4-1). 무등산석영안산암의 Rb-Sr 전암연령은 $80.6 \pm 1.4 \text{Ma}$ 이고, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생치는 0.709280 ± 0.00010 (MSWD; 3.2)으로 백악기 말기에 해당한다(Fig. 4-2, Table 4-1). 이는 해남 완도 지역에 분포한 무등산 안산암의 K-Ar 전암연령을 측정한 문희수의 $68.6 \pm 1.9 \text{Ma}$, (1990)와 해남 완도지역의 구시 납석광상에서 K-Ar의 절대연령을 측정한 김인준과 長尾敬介(1992)의 견운모 연령 $72.9 \pm 1.1 \sim 74.6 \pm 1.8 \text{Ma}$, 전암연령 $68.4 \pm 1.5 \sim 73.6 \pm 1.3 \text{Ma}$ 로 나타나나, K-Ar 절대 연령은 Rb-Sr 전암연령보다 훨씬 짧게 나타나는데 Sudo et al. (1988), Shibata and Ishihara (1979b)는 4~9 Ma, Kagami et al. (1987)는 4~6 Ma, 각각 짧게 나타난다고 제시하고 있으며, Lee (1991)는 K-Ar의 흑운모 연령은 약 3~15Ma, 알카리장석 연령은 약 2~11Ma, 짧게 나타난다고 주장하고 있다. 그 이유는 각 광물의 폐쇄온도(Table 4-2)가 각각 다르고, 또 아르곤이 기체이기 때문에 손실됨에 따라 그 양이 적어졌기 때문으로 생각된다. 그렇다면 본역에 분포한 화성암류의 절대 연대는 상기 화산암류의 값과 일치하며, 따라서 화산암류와 거의 같은 시기 또는 조금 후기에 관입된 것으로 볼 수 있다.

Table 4-1. Rb-Sr isotopic data from the whole rocks in the Mt. Mudeung area.

Rock type	Sample No	Rb(ppm)	Sr(ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
	Kmgr-3	199.7	98.1	5.892	0.717129
micrographic	Kmgr-4	188.6	93.2	5.859	0.717024
granite	Kmgr-6	175.1	168.7	3.004	0.713959
	Kmgr-8	138.0	142.1	2.813	0.713725
Isochron age = $76.8 \pm 3.6\text{Ma}$, Sr initial ratio = 0.71067 ± 0.00023					
	Da-1	107.2	369.6	0.839	0.710242
Dacite	Da-3	69.7	495.1	0.408	0.709742
	Da-4	64.7	522.2	0.359	0.709694
Isochron age = $80.6 \pm 1.4\text{Ma}$, Sr initial ratio = 0.709280 ± 0.000010					

Table 4-2. The comparison of retention temperatures of the whole rock and minerals by the Rb-Sr and K-Ar methods(Dodson, 1973; Wagner et al., 1977; Nishimura and Mogi, 1986). (in $^{\circ}\text{C}$)

Materials	Rb-Sr	K-Ar	Fission-track
Whole rock	720 ± 100	500 ± 100	
Hornblende		500 ± 75	
Muscovite	500 ± 50	350 ± 50	
Orthoclase	360 ± 40	150 ± 30	
Microcline	340 ± 40	150 ± 30	
Biotite	310 ± 40	270 ± 40	
Plagioclase		260	
Sphene			290 ± 40
Zircon			200 ± 30
Apatite			110 ± 15

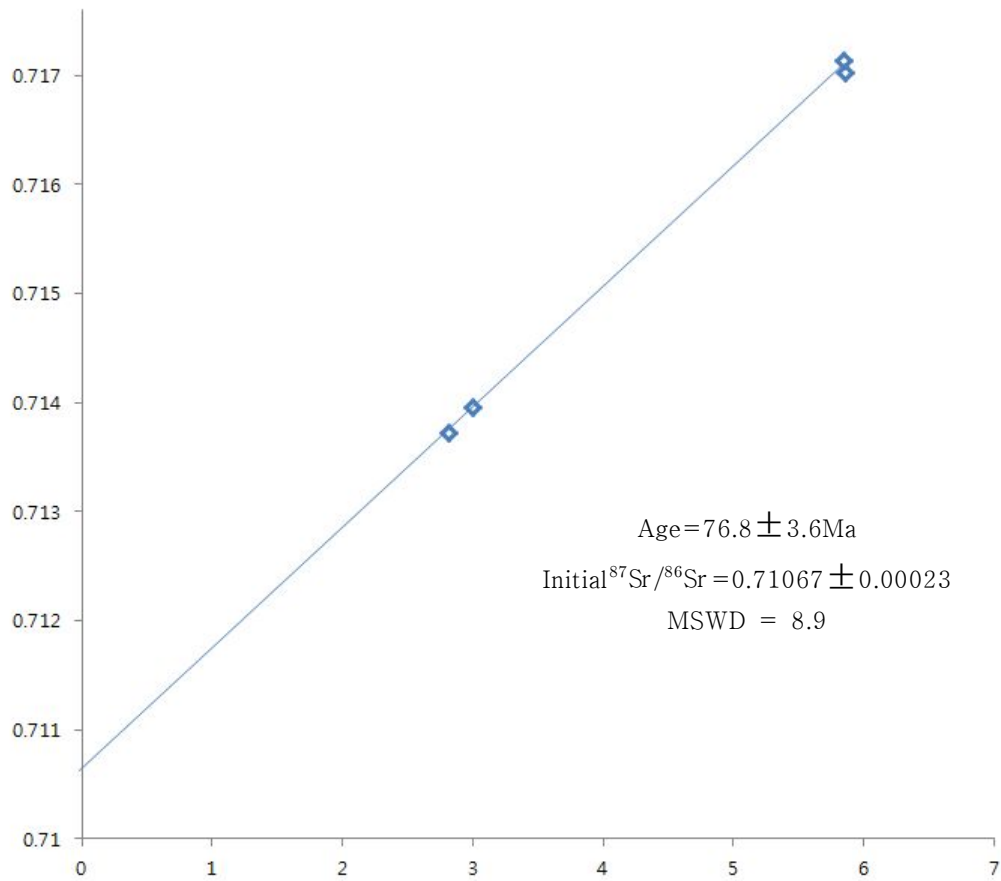


Fig. 4-1. Isochron diagram for the whole rocks of the micrographic granites in the Mt. Mudeung area.

MSWD; mean square weighted deviation

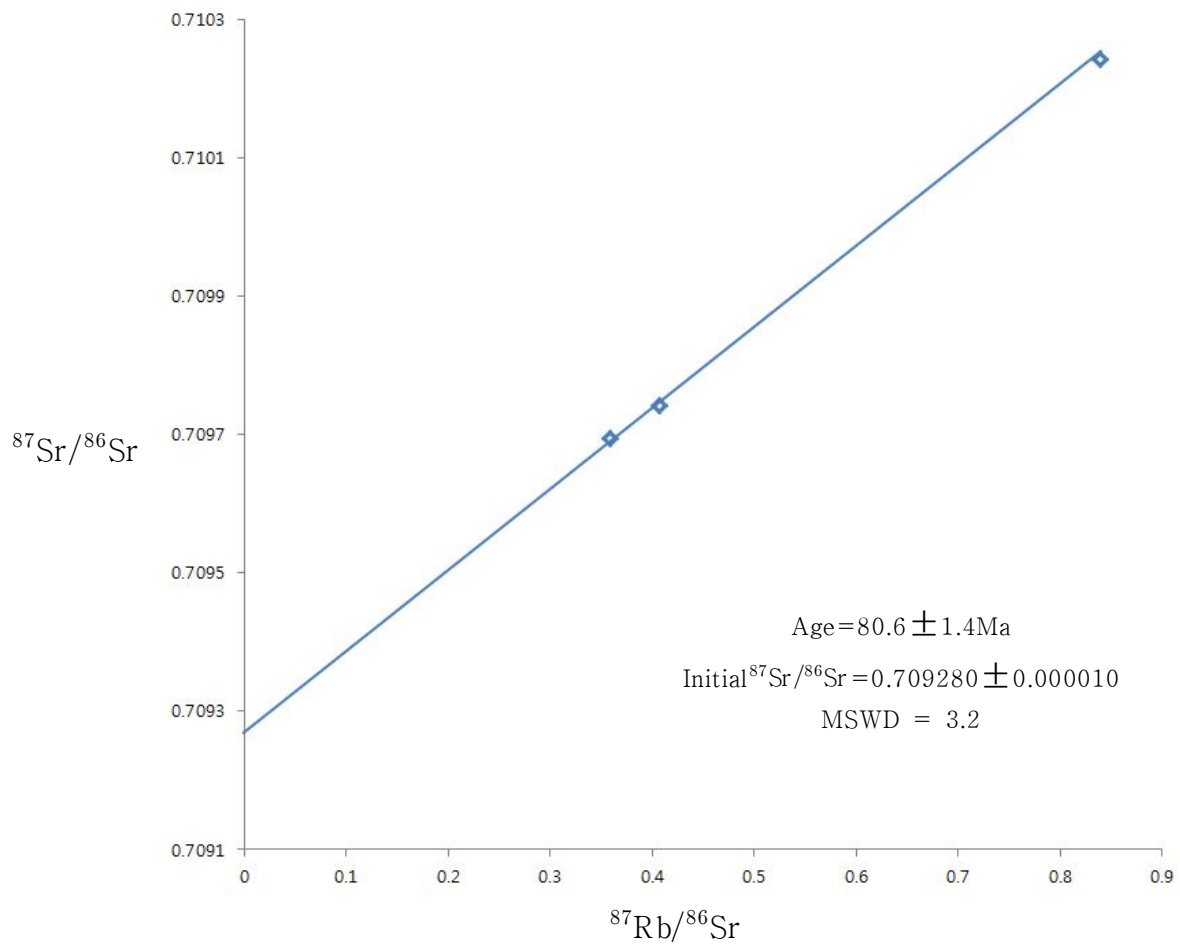


Fig. 4-2. Isochron diagram for the whole rocks of the dacite in the Mt. Mudeung area.

제5장 종합적 고찰

제1절 화성암류의 성인

여기에서는 무등산 지역에 분포하는 화성암류를 형성시킨 마그마의 유형, 특성과 분화과정, 마그마 관입의 지구조적 환경 등을 고찰하고자 한다.

1. 마그마의 유형

화성암류를 형성시킨 근원물질이 화성기원의 마그마인가 퇴적기원의 마그마인가의 유형을 알아보기 위한 노력이 여러 지질학자들(이민성, 1981; Chappell and White, 1974; Tsusue and Ishihara, 1974; Ishihara, 1977; Hine et al., 1978; Czamanske et al., 1981; White and Chappell, 1983)에 의해서 이루어지고 있다. Chappell and White (1974)와 White and Chappell (1983)은 화강암질암류를 암석의 야외 산출상태, 광물학적 및 암석화학적 차이를 기준으로 하여 I-type 과 S-type 으로 구분하였으며, Tsusue and Ishihara (1974)와 Ishihara (1977)는 자철석계열과 티탄철석계열로 구분하여 자철석계열의 화강암질류는 티탄철석계열의 화강암질류보다 더 높은 산소분압의 환경에서 결정되었다고 하였다. 또한 I-type(자철석계열)의 화강암질암류는 각섬석+흑운모+spheue+자철석의 광물조합을 가지며 S-type(티탄철석계열)의 화강암질암류는 흑운모+백운모+석류석+티탄철석의 광물조합을 보인다고 하였다. 본역 미분상화강암을 A ($Al_2O_3-(Na_2O+K_2O)$)-C, (CaO)-F, (FeO+MgO) 삼각도(Fig. 5-1)에 점시하면, I-type에, 나머지화성암류들도 I-type에 해당한다.

또한, K_2O 대 Na_2O 의 관계도(Fig. 5-2)에 점시하면 모두 I-type에 해당한다.

이와 같이 본역 화성암류는 맨틀 기원의 마그마에서 분화된 I-type 또는 자철석계열에 속하는데, 이것은 Jin et al.(1981)과 윤현수와 김선억(1990)에 의한 백악기 화강암질암류의 마그마 유형과 일치한다.

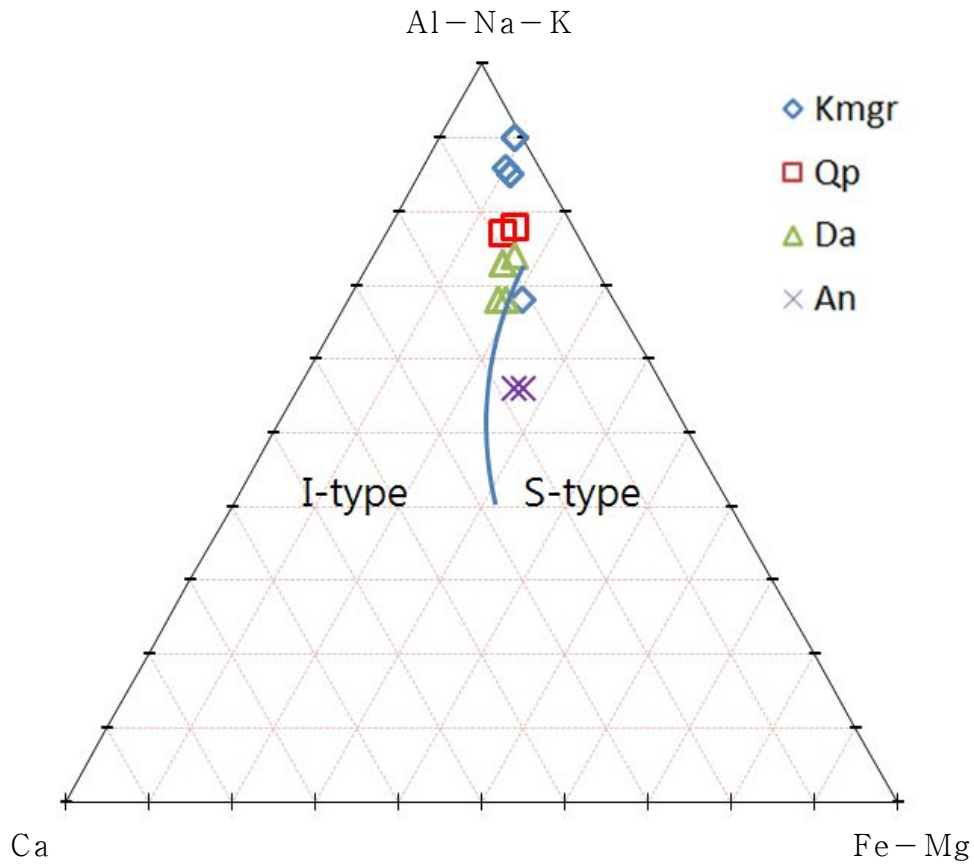


Fig. 5-1. Triangular diagram of molar A ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$)-C (CaO)-F ($\text{FeO} + \text{MgO}$) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after White and Chappell, 1983).

2. 마그마의 특성과 분화

화학조성을 바탕으로 본역 화성암류를 생성시킨 마그마의 특징을 알아 보기위해 Irvine and Barager(1971)에 의해서 제시된 SiO_2 대 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 의 상관도 (Fig. 6-3)에 점시해 본 결과 전체적으로 subalkaline 영역에 해당한다. 또 AFM 삼각도 (Fig. 5-3)에서 본역 화성암류는 calc-alkaline 영역에 속하며, peraruminous ($\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}$) 화강암류에 해당한다(Shand, 1974). 이와 같이 화학 조성의 경향은 대부분 calc-alkaline 계열의 일반적인 특징이다(Wright, 1969; Jin et al., 1981).

N-C-K ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}$) 삼각도(Fig. 5-4.)에서 본역 화성암류는 N-K선상 가까이 밀집되어 분포한다. 이는 일본의 화강암질암류의 평균치, 남한의 백악기 화강암류의 평균치, 대전-공주간 및 담양-진안간의 화강암질암류에서 보여주는 바와 같은 전형적인 calc-alkaline 계열의 마그마에 의해 생성되었음을 보여 준다 (Aramaki and Nozawa, 1978; 김정빈, 1990; Jin et al., 1981; Jin, 1988; 권치순, 1987; 김용준과 김정빈, 1988). 주성분 원소의 AFM 삼각도(Fig. 3-5.)에서도 FM쪽으로부터 A정점으로 접이하는 calc-alkaline 마그마의 분화 특징을 보여준다.

한편, 본역 미분상화강암이나 기타 화성암류를 SiO_2 대 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 의 상관도 (Fig. 5-5)에 점시하면 마그마가 분별결정작용에 의해 점진적으로 분화된 경향을 보인다 (Tindle and Pearce, 1983).

그리고, 미량성분 원소에서 Ba 대 Sr의 관계도와 Ba 대 Rb의 관계도(Fig. 5-6.)에서 결정작용이 진행됨에 따라 본역 화성암류의 Sr/Ba의 비는 뚜렷이 감소하는 경향을 나타낸다.

분화의 특징을 잘 나타내주는 Ba, Rb 및 Sr의 원소를 이용하여 분화의 특징을 살펴보면 산성암에서는 Ca의 함량이 감소하면 Sr의 함량도 감소한다(Taylor, 1965). 그러나 Ba은 이온 반경이 1.34 Å으로써 K(1.33 Å)과 비슷하여 분화 초기에 생성된 암석내에서는 그 함량이 증가하나, 분화말기에는 Rb의 K에 대한 선택적 치환성 때문에 Ba의 함량은 급격히 감소한다. Rb은 이온 반경이 1.47 Å이지만 K과 강한 응집력을 가지고 있으므로 분화과정 후기에는 K에 많은 양이 농집된다(Bouseily and Sokkary, 1975). 그러므로 마그마의 분화가 진전됨에 따라 그 상대적인 함량비는 Sr-Ba-Rb 순으로 많아진다.

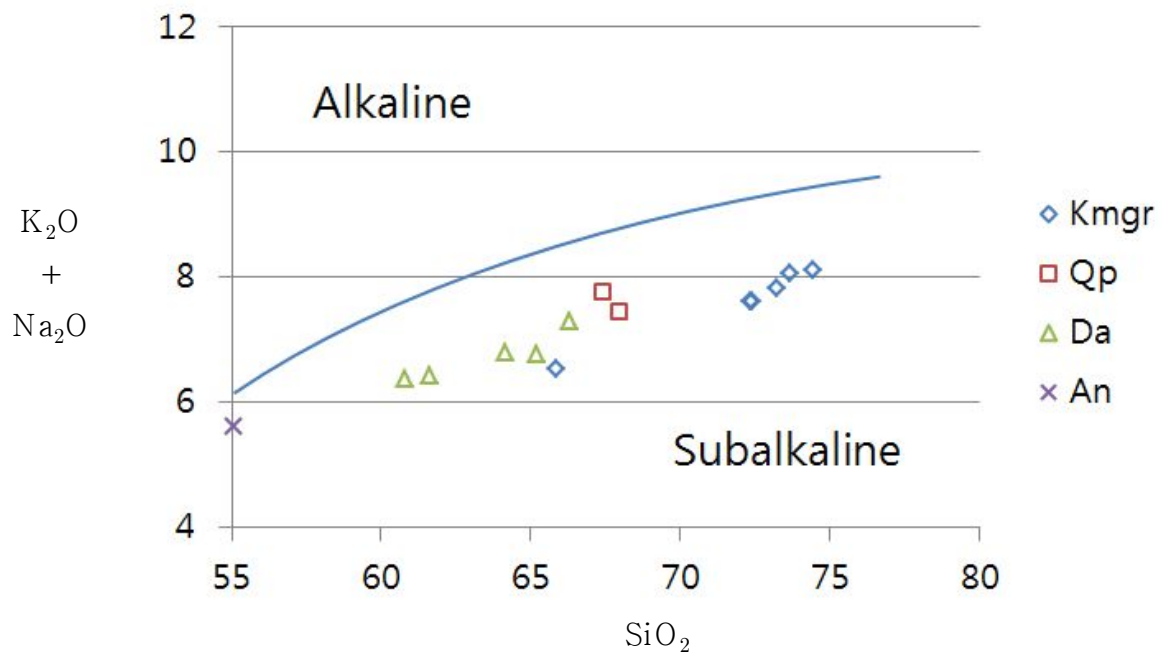


Fig. 5-3. The relationship between total alkali and SiO₂ in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after Irvine and Baragar, 1971).

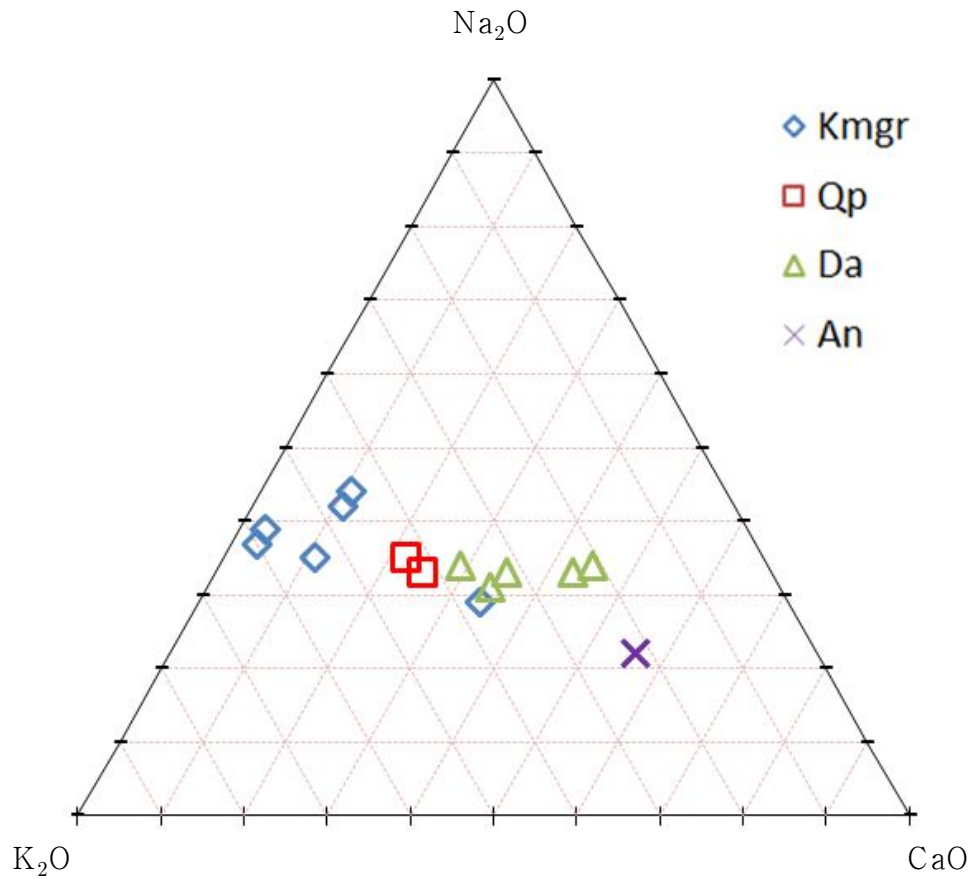


Fig. 5-4. Triangular diagram of NCK(Na₂O-CaO-K₂O) (wt.%) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area.

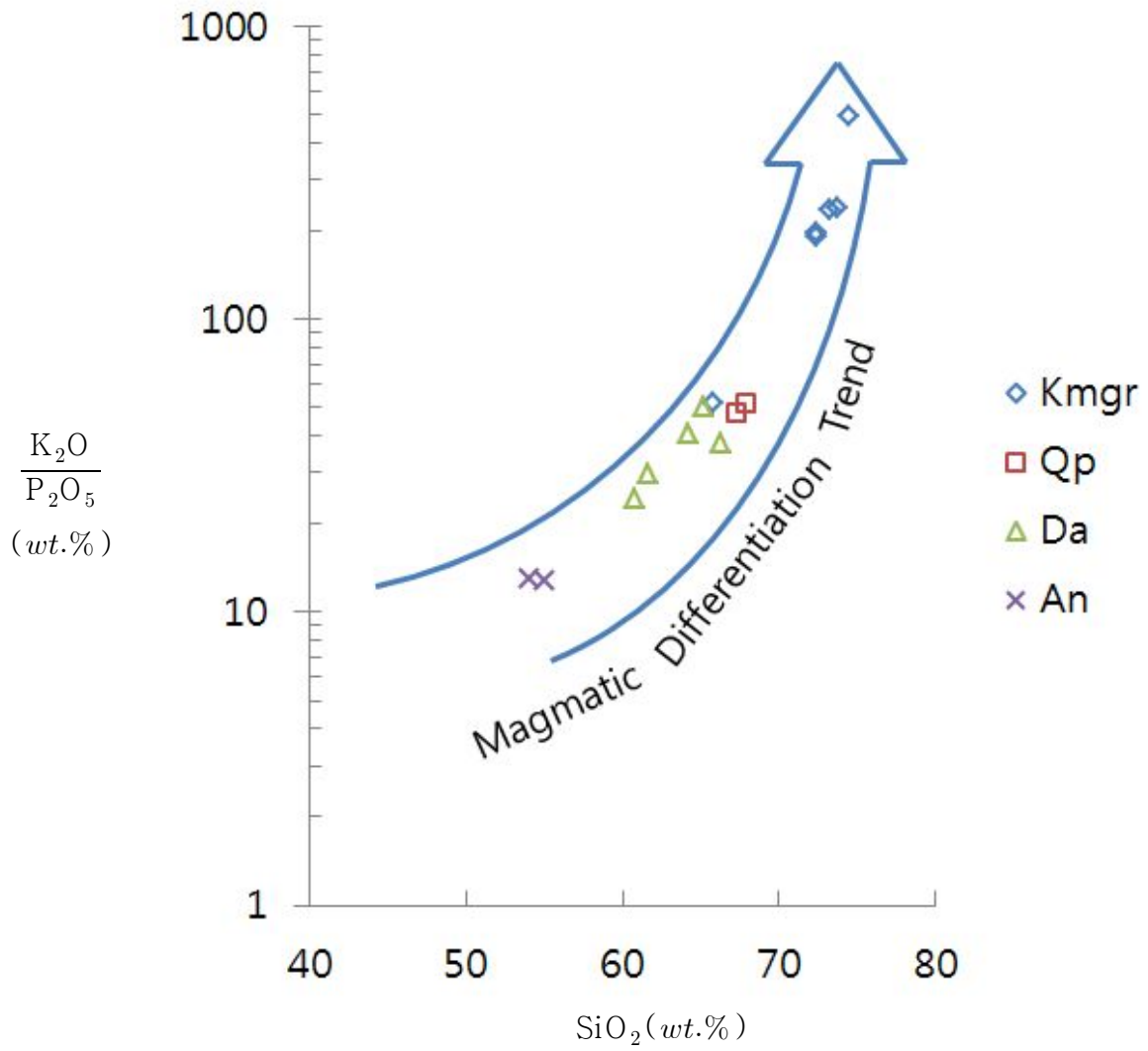


Fig. 5-5. K_2O/P_2O_5 vs. SiO_2 in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after Tindle and Pearce, 1983).

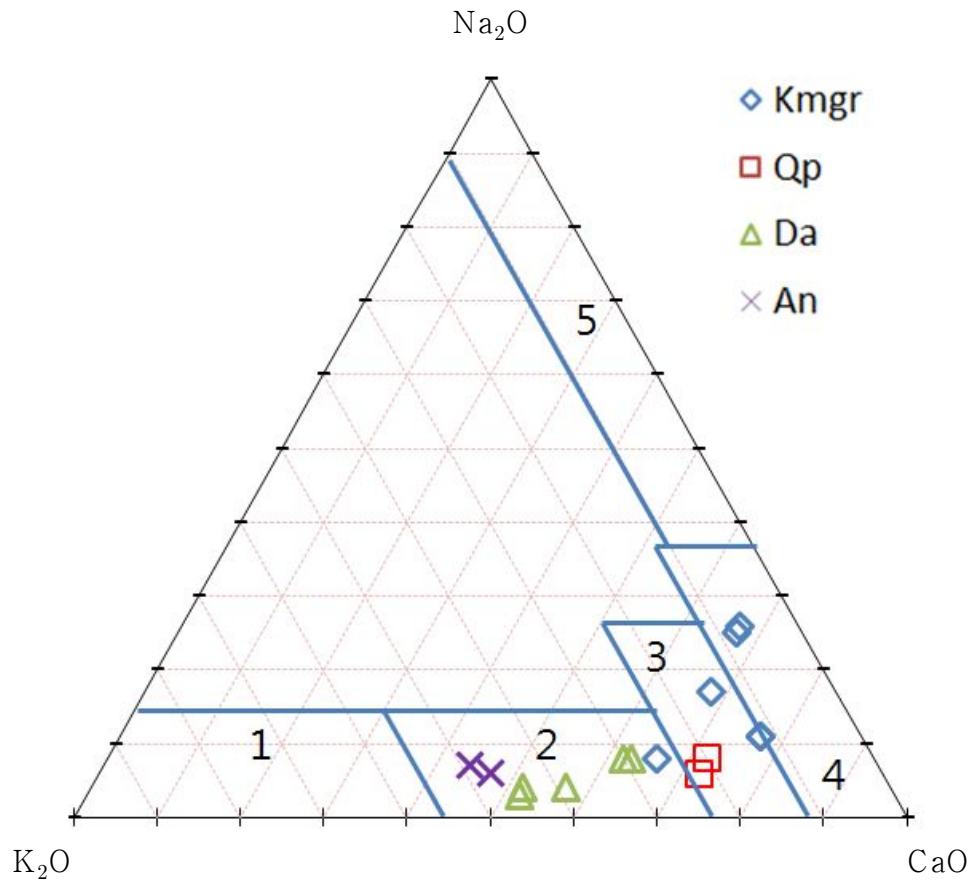


Fig. 5-6. Triangular diagram of Rb-Ba-Sr system in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after Bouseily and Sokkary, 1975).

- 1 : diorite, 2 : granodiorites and quartz diorites,
- 3 : anomalous granites, 4 : normal granites,
- 5 : highly differentiated granites

3. 마그마 관입의 지구조적 환경

화성암을 이루는 화학조성의 특징을 근거로 화강암의 마그마 작용과 관련한 그 암체 관입의 지구조적 환경을 규명하려는 연구가 활발하게 이루어져 왔다 (Iddings, 1892; Harker, 1909; Barth, 1962; Dickinson, 1971; Peacock, 1931; Martin and Piwinski, 1972; Johnston et al., 1976; Petro et al., 1979; Pitcher, 1982; Pearce et al., 1984; Betchelor and Bowden, 1985).

조산운동에 의해 형성된 심성암체는 대양판과 대양판의 경계부, 대양판과 대륙판의 경계부 및 대륙판과 대륙판이 충돌하는 경계부, 즉 압축판 경계부의 섭입대에서 형성된다(Dickinson, 1971). 반면 조산운동과 관련 없이 형성된 심성암체는 팽창판의 경계부, 즉 대륙의 새로 생긴 경계부나 rift zone에서 형성된다.

Martin and Piwinski(1972)가 화성암류의 화학조성과 구조적 환경 관계를 연구하였으며, 이에 대하여 여러 학자들에 의해서 많은 연구가 있었다(Christiansen and Lipman, 1972; Strong and Minatids, 1975; Johnston et al., 1976; Petro et al., 1979).

Martin and Piwinski(1972)는 분화지수(D.I)의 분포도를 정량적으로 계산하여 화성암류를 조산운동에 의해 형성된 암체와 비조산운동에 의해 형성된 암체로 구분하였다. 조산운동에 의해 형성된 암체는 분화지수의 분포도가 intermediate mode를 가지는 unimodal 형태이나 비조산운동에 의해 형성된 암체는 felsic-mafic mode의 bimodal 형태를 나타낸다. 또한 비조산운동에 의해 형성된 화성암류는 AFM 삼각도에서 화학조성이 보다 넓게 분포하며 분화지수 역시 넓게 분포되는 경향을 갖는다.

Johnston et al.(1976)은 compressional 화강암질 암류는 Al_2O_3 가 과포화이고 FeO가 비교적 적으며 MgO와 CaO는 높은 값을 나타내는데 비하여 extensional 화강암질암류는 Al_2O_3 가 덜 포화되고 FeO가 비교적 많으며 MgO와 CaO 양은 낮은 값을 보인다고 하였다.

Christiansen and Lipman (1972)은 $CaO/(Na_2O+K_2O)$ 의 비로 화산암의 구조적 형태를 구분하였는데, calc~alkali는 Peacock (1931)의 알카리-라임지수와 같고, calc~alkali지수는 조산성 화산지역 (60~64)이 비조산성 화산지역 (50~56)보다 높다고 했다. 그리고, Strong and Minatidis (1975)는 이 지수를 심성암류의 구조적

환경에 적응하여 화산암류와 비교하였다. 본역 화강암의 calc~alkali지수는 60.5 (Fig. 5-7)로써 대체로 조산운동에 수반되어 형성된 암체로 생각할 수 있다.

Johnston et al (1976)과 Petro et al (1979)에 의하면 calc~alkali지수가 60~64인 Peraluminous 화강암은 압축장 환경 (Compressional tectonic setting)에서 생성되고, calc~alkali지수가 50~56인 peralkaline ($Al_2O_3 < Na_2O + K_2O$) 화강암은 신장성 환경 (extensional tectonic setting)에서 생성된다고 한다. 따라서 본역 화강암류는 Al_2O_3 함량(평균 13.35%)이 $Na_2O + K_2O + CaO$ 의 함량(평균 8.74%)보다 많고, (Fig. 5-7)에서와 같이 calc-alkaline 지수가 60.5이므로 압축장 환경 하에서 생성된 것으로 생각된다.

그러나 광물과 주성분 원소에 의해 지구조적 환경을 구분하는 것은 보통 몇 개의 변수에만 의존하기 때문에 그 분별도가 낮아서 tectonic magmatism 연구에서는 미량원소의 거동과 분포도가 중요하게 이용 된다 (Pearce et al., 1984).

Pearce et al.(1984)은 화강암질 암류의 미량성분 원소의 분포로써 마그마 관입의 구조적 환경을 ORG(ocean ridge granite), VAG(volcanic arc granite), WPG(within plate granite) 및 COLG(collision granite)의 4개 group으로 나누었다. 본역 화성암류를 SiO_2 대 Rb, Y의 관계도(Fig.5-8)에 점시하면 대부분 VAG+syn-COLG 영역에 점시된다. 상기와 같이 주성분 및 미량성분 원소에 의한 암석화학적 특성에 의하면 무등산미문상화강암의 마그마관입의 지구조적 환경은 대륙주변부의 volcanic arc 또는 syn-COLG 지역이라고 생각된다.

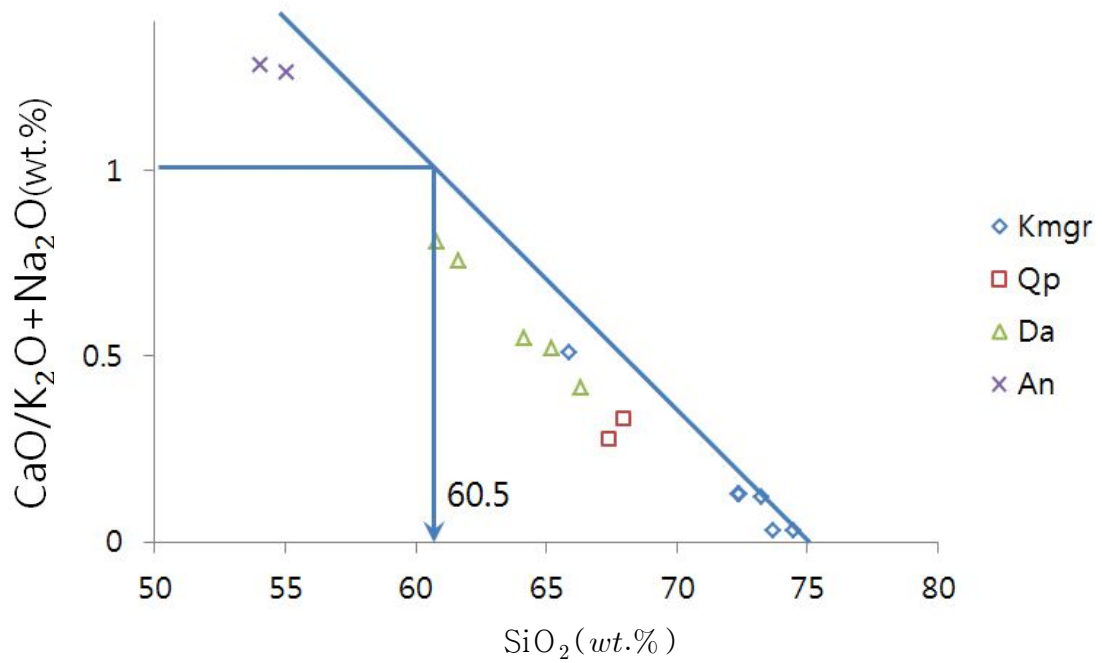


Fig. 5-7. CaO/Na₂O+K₂O vs SiO₂ (wt.%) in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after Petro, 1979).

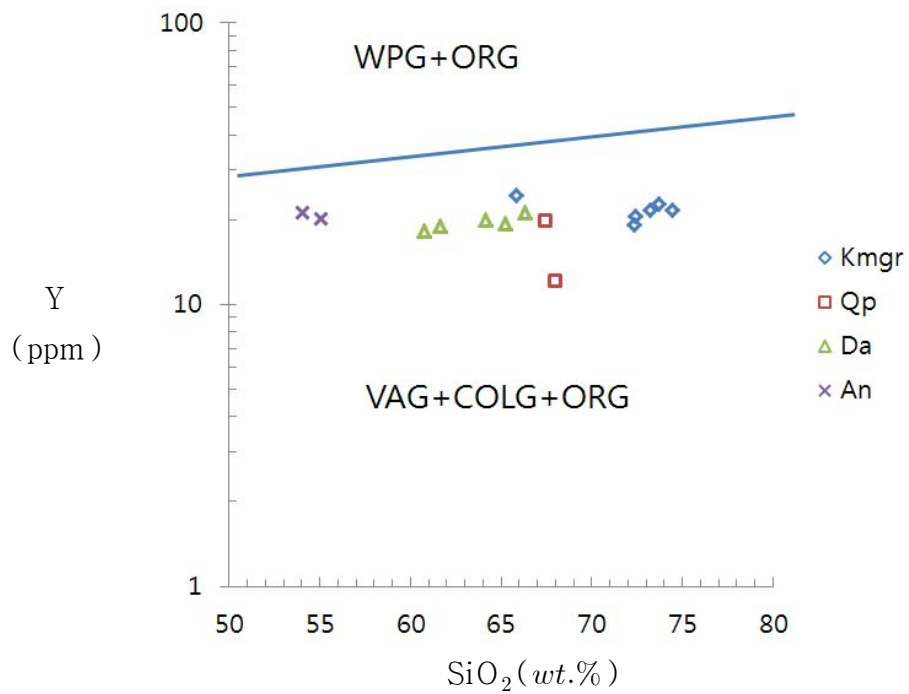
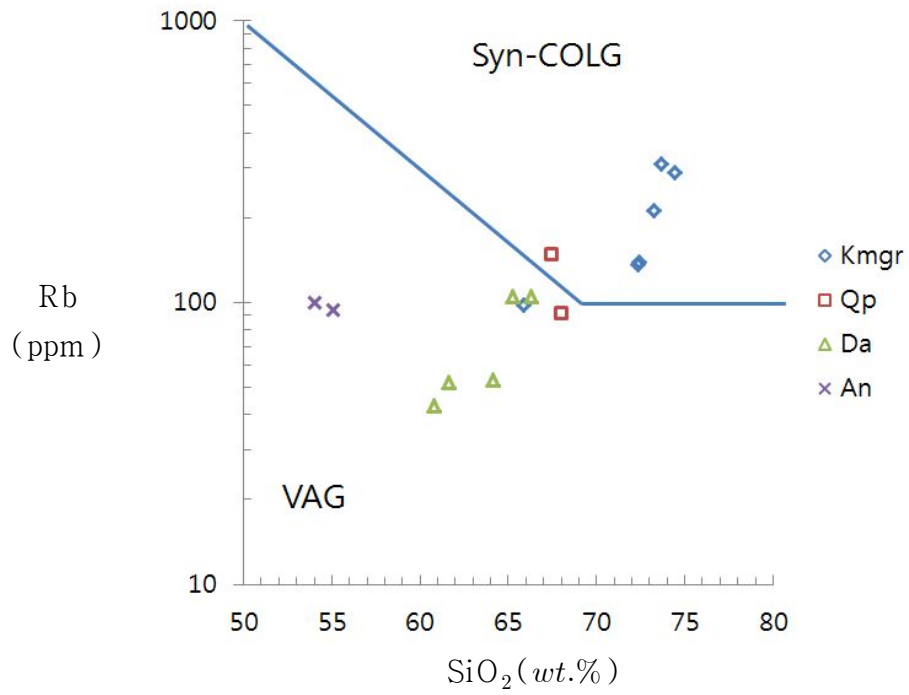


Fig. 5-8. SiO₂ vs Rb, and Y in the igneous rocks from the Mt. Mudeung area (after Pearce and Tindle, 1984).

제2절 미문상화강암의 기원

석영과 장석의 연정은 기원, 조직 및 산상 뿐만 아니라 체적 구성에 따라 granophyric intergrowths, myrmekite, graphic granite 세 가지로 구분된다. granophyric intergrowths란 석영과 알카리장석이 급히 냉각된 연정이며, myrmekite란 사장석 모암에 석영이 vermicular하게 연정을 이룬 것을 말한다. 한편 graphic granite란 석영과 알카리장석 또는 Na사장석의 연정을 말한다 (Barker, 1970).

본역에서 화강암질암석의 연정조직은 일반적으로 반상조직을 갖고 있는 암석의 석기부분에서 석영과 알카리장석이 연정을 보이고 있는데, 다만 현미경하에서만 볼 수 있기 때문에 "미문상"이란 용어를 사용하며, 이와 같은 문상조직은 알카리장석과 석영의 연정으로 일반적으로 문자모양 또는 췌기모양(runic or cuneiform)을 나타낸다. 조립질 연정은 graphic granite라 부르며 세립질 연정은 granophyric조직이라 부른다. 이들 조직은 거의 공융점 구성을 가진 높게 분화된 화강암질 암석이나 화강암질pegmatite에서 우세하게 발견되지만, 화성암류에서 넓게 분포하지 않으므로 별로 중요하게 다루어지지 않고 있다. 그렇지만 문상 조직의 발달 과정은 화강암질 암석의 결정화작용을 연구하는데 있어서 매우 중요하게 고려될 수 있다 (Fenn, 1986).

Barker(1970)는 연정의 크기에 따라 "granophyric" 조직이란 세립질 연정 (초현미경적~1 또는 2 mm), 그리고 "graphic" 조직이란 조립질 연정 (1mm~1m)의 크기를 갖는다고 했다.

지금까지 미문상화강암의 기원에 대해서는 열수변질 (Taylor, 1968)과 교대변위 (Jahns et al., 1969)와 같은 많은 가설이 제안되어져 왔지만, 최근에는 석영과 장석의 결정화작용에 의해 지배된 동시연정 (Fenn, 1986; Swanson and Fenn, 1986)이 학자들 사이에서 가장 믿을 만한 학설로 보고되고 있다. 미문상화강암의 산상은 영동-광주함몰대의 무등산지역이나 해남, 완도와 경상분지 등 분포지역마다 약간씩 다르나 석영과 알카리장석의 연정에 의한 조직적 특징은 매우 비슷하다. 가장 중요한 특징은 사장석 반정 주위에 석영이 배열되어 있는 "hourglass" 조직이 관찰된다. 이들 조직은 미문상 조직이 석영과 장석의 동시연정의 산물임을 강력히 시사해주고 있다(Lee, 1991).

미문상화강암의 생성 기구에 대해서는 화강암질pegmatites의 온도, 압력과 조성변화 등을 통해 연구되어 왔다 (Fenn, 1986; Swanson and Fenn, 1986). 그들은 그 조직이 비평형조건(nonequilibrium), 역학적인 이동 (kinetically driven)아래서 과냉각도 ($\Delta T =$ 마그마의 액상 온도-결정성장온도 ; undercooling = temperature of the upper stability limit of crystal - temperature at which crystal growth begins)의 증가에 따른 석영과 장석의 동시성장(simultaneous growth)에 의해서 만들어졌다고 주장했다. 여기서 동시성장이라고 하는 것은 고전적인 공용점 결정화작용에 의한 것이 아니고 성장하는 결정의 경계면에 인접한 경계층(boundary layer)에서 운동현상을 말한다.

본역의 미문상화강암에서 miarolitic 기공의 일반적 산상은 수증기상의 용리에 의한 증거이다. 각 광물의 액상선 온도는 증기상의 탈 가스작용(degassing of vapor phase) 또는 용리작용으로 증가한다. 결과적으로 각 광물의 과냉각도는 증가하는데, 그 때에 과냉각도가 특별히 증가한 석영과 장석에 의해 미문상 연정이 형성되는 것이다. 이와 같이 과 냉각도를 지배하는 2단계 압력강하(Two-stage decompression)가 미문상화강암의 주요 형성기구라고 결론 지어진다 (Westrich et al., 1988). 무등산 미문상화강암의 체적조성과 반정조합이 완도 미문상화강암이나 해남 미문상화강암등 다른 지역의 미문상화강암들과 비록 다르다 할지라도 여러 암체들 사이의 광물조합과 석기의 조직이 매우 비슷하다. 그러므로 해남이나 완도 미문상화강암과 똑같은 기구(mechanism)가 무등산 미문상화강암의 생성에 적용될 수 있다.

따라서, 본역에서 미문상화강암은 단층 또는 열극과 밀접하게 관련되어 분포하는 특성을 고려하면 이러한 약대를 따라 증가하는 증기상의 탈 가스화작용 또는 용리작용에 의한 과냉각도의 증가가 미문상화강암과 이에 수반된 miarolitic 기공을 형성시킨 주된 요인이었을 것으로 생각된다.

제3절 지구조운동 및 무등산 지역의 형성사

영동-광주합몰대 (김옥준과 박봉순, 1980) 지역에서는 경상분지와 유사한 화성활동을 보이는데, 후기 백악기 화산활동과 그에 뒤이은 심성관입 활동이 매우 체계 있게 이루어지며 백악기 화산성퇴적암류, 화산암류 및 화강암류는 대체로 환상의 분포를 보이고 있음이 특징이다.

Jin et al.(1981), 차문성 과 윤성호 (1988)는 심성관입암체가 화산암류로 둘러싸여 있음을 함몰구조(cauldron)에 기인한 것으로 해석한 바 있다. 영동-광주합몰대에서의 화성활동은 Jin(1980, 1985)과 Jin et al. (1981)에 의하면 한반도에서의 화성활동이 아시아대륙판과 해양판(Kula판 및 태평양판)과의 상호이동의 결과로 침강된 해양지각의 부분용융에 의해 만들어진 calc-alkali계열의 안산암질 또는 중질칼크화강섬록암질마그마에 의한 것이라고 주장한 바 있다.

따라서, 영동-광주합몰대에서도 경상분지에서처럼 해양지각의 섭입이 일어났던 해구쪽에 가까운 남해지역 76.0 ± 2.3 Ma(민경덕 등, 1988), 순천지역 80.4 ± 2.4 Ma (민경덕 등, 1988), 목포지역 63~67 Ma(이대성과 이하영, 1976; 차문성 등, 1986)에서 내륙쪽인 광주지역 83.2 ± 2.5 Ma(민경덕 등, 1988), 운장산지역 85 Ma (이대성, 1971; 차문성 등, 1986)으로 올라가면서 지질연대가 오래된 것을 볼 수 있는데 이것은 퇴적암의 층서를 살펴보면 더욱 더 확실히 알 수 있다. 즉, 내장산 분지 및 이남의 분지들에는 하양층군이 없이 유천층군이 분포하며 왕성한 화산활동이 있었다. 영도에서 강진에 이르기까지 대체로 시대의 경과에 따라 남쪽을 향하여 층위상보다 상위의 화산활동과 퇴적작용이 이행된 양식으로 분지발달이 진행되어 갔음을 볼 수 있다(장기홍, 1982).

1. 화성 활동

일반적으로 본역의 화성암류는 앞서서도 언급한 바와 같이 천소에 정지된 특징을 보인다. 영동-광주합몰대의 지각의 구조는 화강암질마그마의 상승이 중요한 역할을 하였다고 생각된다. 초기 백악기에 확장하는 경계분지였다고 생각되는 영동-광주합몰대는 해양암판의 섭입에 의해 시작된 압축력이 없었거나 아주 약했을 것이다. 함몰대의 퇴적암 사이에 들어 있는 알카리현무암은 이와 같은 가설을 뒷받침해 주고 있다.

백악기 중기에는 많은 양의 calc-alkali 마그마작용이 함몰대에서 시작되었다. 이 마그마작용은 유천그룹의 화산활동과 불국사 심성작용으로 나뉘는데 그들은 일반적으로 동시기원의 마그마로 생각하고 있다(원종관, 1968; 차문성, 1976; 이상만과 김상욱, 1987). 화강암류의 전암분석에서도 섭입과 관련된 calc-alkali 마그마의 특징을 보여준다. 이것은 압축력이 백악기 중기에서 후기 동안에 함몰대에서 우세했었다고 생각된다. 팽창과 압축 사이에서 관련된 강도의 역할을 이해하는 것은 함몰대에서 마그마작용의 문제를 해결하기 위한 중요한 단서의 하나가 될 수 있다.

화강암질마그마 작용의 분화모델은 화성활동 및 지구조운동과 관련해서 (Fig. 6-12)에서 보여주고 있다.

가. 백악기 초기(140-120Ma)

Ueda and Miyashiro(1974)에 의하면 백악기 초기에 태평양 북서부에 위치하였던 냉각된 Kula판의 끝이 구 일본과 부딪쳐서 아시아 대륙밑으로 들어가면서 확장하는 경계분지가 아시아 대륙의 동쪽 경계부에서 발달하여 육성퇴적물과 화성활동에 의한 화산분출물이 퇴적되었다. 이 시기에 영동-광주함몰대 지역에서는 전주의 동북쪽에 분포하는 운장산 응결응회암이 퇴적되었으며(차문성 등, 1986), 경상분지에서는 분지가 열리면서 신동그룹의 퇴적암이 분지의 서쪽 경계지역에서 퇴적되었다. 분지의 서쪽 경계부에서 단지 신동그룹을 피복하고 있는 하양그룹은 분지의 나머지 지역에서 선 백악기 기반암을 덮고 있다. 암석권이 약해지는 것과 관련된 맨틀 용승은 하양그룹의 초기 퇴적작용 동안에 학봉현무암에 의해 나타난 알카리현무암의 분출에 원인이 있다(장기홍, 1977; 원종관 등, 1990). 이 시기에 해양암판의 섭입의 역할은 명확하지 않다. 만약 해양암판이 대륙암판 밑으로 섭입되었다면 판의 각이 최근 활동적인 back-arc basin에서 보여준 것처럼 30° 이상으로 가파라야 한다(Uyeda and Kanamori, 1979; Brooks et al., 1984)

나. 백악기 중기(120-90Ma)

이 기간 동안에는 해양암판의 섭입이 왕성해져서 맨틀까지 들어갔다. 이때 benioff대에서 함수광물인 운모류, 녹니석, 각섬석 및 사문석 등이 탈수분해 작용에 의해 H₂O를 방출하여 그 H₂O가 wedge 맨틀에 공급이 되었으며 따라서 확장되고 있

던 대륙연변부의 직하에 있던 맨틀이 부분 용융되어 현무암질마그마를 생성시켰다. 이 현무암질마그마 용액들이 모여서 지각하부에까지 상승하게 됨에 따라 지각하부를 용융시킨다. 지각하부가 용융됨에 따라 화강암질 마그마를 생성시키고 맨틀에서 생성된 현무암질마그마와 혼합되어 중성마그마가 생성되어졌으며, 본역에서는 94 Ma를 전후해서 맨틀의 대류 또는 diapiric 상승의 힘에 의한 장력으로 얽아진 대륙연변부는 갈라지게 되고 이 중성마그마의 일부에 의한 화성활동이 일어났다. 그 후 지각하부에서 화강암질 마그마가 상승하여 지각물질과 혼합됨에 따라 재생마그마가 생성되었으며 이 때 마그마의 조성은 알카리에서 calc-alkali로 변해간다. 또한 지각에 작용한 구조적 응력은 점차적으로 팽창에서 압축으로 변해간다.

따라서, 이 기간 동안에 해남지역에서의 화성활동은 문희수 등(1990)에 의하면 가장 먼저 후기 백악기의(94.1±2.01Ma)에 중성 화산활동이 화원반도를 중심으로 성층 화산을 형성하고 이에 수반된 화산쇄설성 퇴적암을 퇴적하여 화원층을 형성하였으며, 이에 뒤이어 우항리층의 퇴적기간 후기에 산성 화산활동이 시작되어 (82.88±1.1 Ma) Plinian 분출상에 의한 응회암질퇴적물이 우항리층 내에 퇴적되고, 더욱더 화산활동이 격렬해져서 대규모의 유문암질회류응회암 (rhyolitic ash-flow tuff)을 분출하여 직경 약 30km의 해남-목포칼데라를 형성하고 황산회류응회암을 퇴적시켰다. 영동-광주함몰대에서는 영동분지, 진안분지 및 능주 분지에 퇴적물이 퇴적되었다. 이처럼 양 지역에서는 중성화산활동이 일어나 각종 응회암이 퇴적되었으며, 많은 양의 calc-alkali마그마가 분출되었음이 특징이다. 따라서 이 시기에 비교적 원초적인 조성을 가진 해남 반상흑운모화강암은 이지역의 서쪽 부분에서 관입하였다. 그것은 맨틀에서 가져온 마그마가 점차적으로 백악기 초기에서부터 중기까지 감소했다고 생각되며, 즉 맨틀의 용승부터 맨틀 diapir까지 섭입판에서 빠져나간 유체는 광범한 하부지각을 용융시키는데 중요한 역할을 할 수 있었다.

다. 백악기 후기(90-63Ma)

압축 환경으로 바뀌면서 82Ma를 전후해서 마그마의 재생에 의해 다량으로 여러 곳에 생긴 마그마가 거의 동시 다발로 상승하면서 한반도의 남부지역 여러 곳에 중성 내지 산성의 화성활동이 있었다. 이때 유천층군에 해당하는 중성화산암류와

응회암이 퇴적되었고 퇴적물의 하중에 의해 지각에 단층과 열극이 형성되어 칼데라가 생성되었다.

70~75Ma를 전후해서 칼데라 생성시 만들어진 단층과 열극을 따라 재생된 중성 및 산성마그마의 환상열극화산작용이 일어나 무등산 안산암 및 만안리유문암을 분출하였다. 이때 두륜산지역에서도 직경 약 20km의 칼데라가, 완도지역에서는 직경 약 10km의 칼데라가 형성되었으며 장구리응회암(64Ma 신상은개인통신)을 퇴적시켰다. 칼데라의 중앙부에서는 마그마유의 상승에 의해 중앙심성암체가 관입 정치하였으며, 칼데라 저면은 해남-목포합몰체 (차문성과 윤성효, 1988; 윤성효, 1990)에서는 산이화강암을 중심으로 돛상의 배사구조를 보여주며 해남과 완도합몰체에서는 이 지역의 미문상화강암을 중심으로 ring-dike 모양의 환상구조를 보여준다.

2. 지구조 운동

김옥준(1971), 김옥준과 박봉순(1980)에 의하면 영동-광주합몰체의 지구조운동은 Kula판과 태평양판의 섭입에 의해 백악기 중기에 경상분지가 열리면서 신동층군(하성 또는 호성환경)이 퇴적되고, 경상분지가 확장되면서 하양층군이 형성되었다. 이 시기에 열리기 시작한 영동-광주합몰대도 썩기모양으로 형성되었고, 그 안에 영동분지, 진안분지 및 능주 분지가 형성되었다.

한편, 이 시기에 양 지역에서는 중성 화산활동이 일어나(80Ma) 각종 응회암 등이 다량으로 퇴적됨에 따라 퇴적물의 하중에 의해 지각에 단층과 열극이 형성되어 여러 곳에 칼데라가 생기기 시작했다. 칼데라가 형성된 후 단층과 열극면을 따라 중성과 산성 마그마의 활동(70~75Ma)이 일어났다. 그때 유천층군에 해당하는 중성 화산암류와 응회암이 퇴적되고 불국사화강암류들이 천소에 관입함에 따라 합몰체 구조를 생기게 했다. 한편, 이 시기에 경상분지에서도 하양층군과 유천층군이 넓은 지역에 퇴적하였으며 영동-광주합몰대와 비슷한 화성활동과 합몰체가 형성되었을 것으로 생각된다.

결국, 영동-광주합몰대는 백악기에 Kula판과 태평양판의 섭입에 의해 열리기 시작하였으며 그곳에 분포하는 화강암류들은 그곳이 열릴 때 천소에 생긴 단층과 열극을 따라 stopping 하는 마그마에 의해 천소에 관입하는 불국사 화강암류에 속하는 미문상화강암류 등이 정치-관입 되었다고 생각된다.

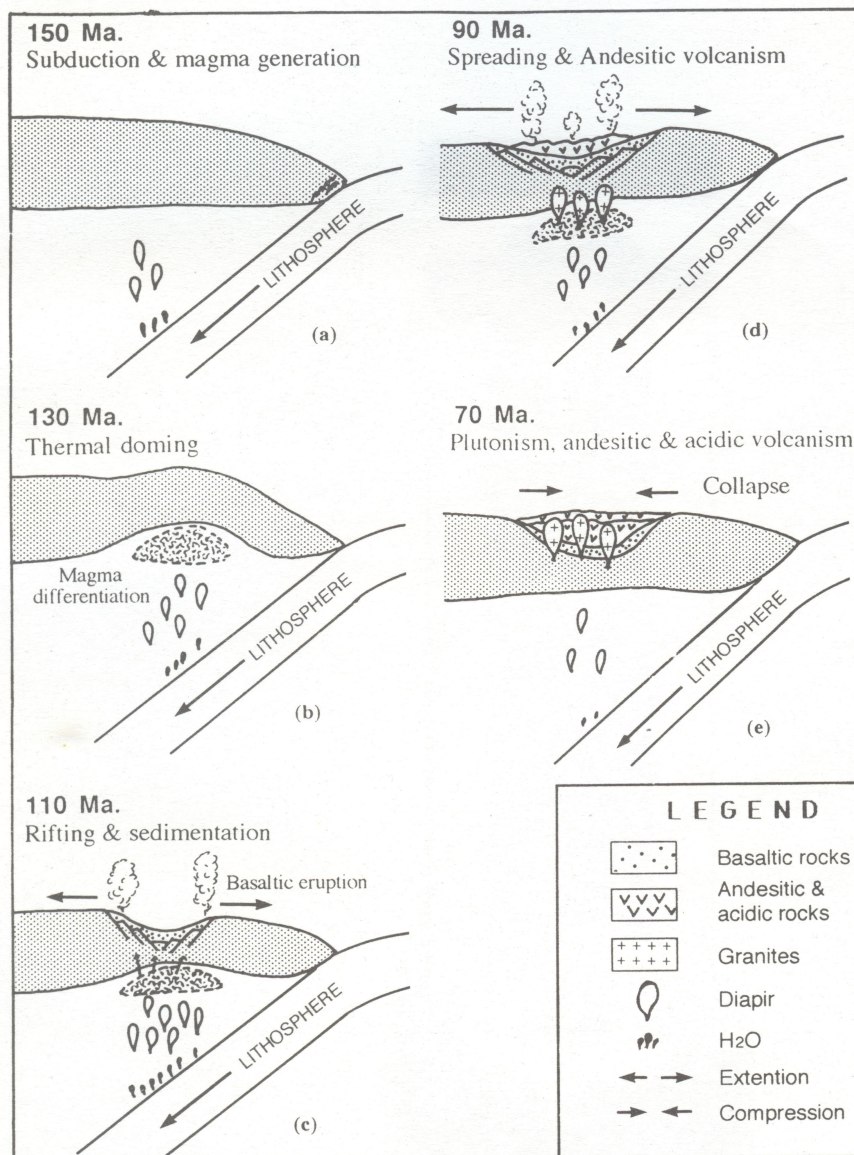


Fig. 5-9. A Schematic presentation of the model for granitic magmatism in the Yeongdong - Gwangju depression (Shin, 1994).

제6장 결론

무등산 지역에 분포하는 화성암류는 다음과 같은 암석화학적 특징과 성인을 거쳐 만들어졌다.

(1) 무등산 지역 화성암류는 화강편마암, 각섬석흑운모화강섬록암, 백악기 화성암류로 구성되어 있다. 백악기 화성암류는 안산암-데사이트-유문암으로 구성된 화산암류와 미문상화강암과 석영반암 등의 심성-반심성암으로 구성되어 있다.

(2) 이들 화성암류는 중생대 송림변동-대보운동-불국사변동의 화성활동 산물로서 각 지질시대에 분출, 관입 한 화성암류들의 일련의 분화산물들로서 칼크-알칼리암계열에 속하며, 희토류 원소는 모두 LREE가 HREE보다 부화되고 (-)Eu 이상도 비교적 낮은 값을 보인다.

이는 대륙이나 대륙연변부에서 구조 운동 시 생성되는 화강암류가 보이는 특징과 일치한다.

(3) 총희토류 함량에 대한 La/Yb 변화도와 바나듐에 대한 SiO₂ 변화도는 화산암에 대한 분화도와 자철석 분별결정작용을 받은 순서가 화순안산암 → 무등산데사이트 → 석영반암 → 미문상화강암임을 지시해 준다.

(4) 무등산 지역 미문상화강암의 Rb-Sr 전암연령은 $76.8 \pm 3.6 \text{Ma}$ 이고, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생치는 0.71067 ± 0.00023 (MSWD; 8.9)으로 백악기 말기에 해당한다.

무등산 석영안산암의 Rb-Sr 전암연령은 $80.6 \pm 1.4 \text{Ma}$ 이고, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생치 0.709280 ± 0.000010 (MSWD; 3.2)으로 백악기 말기에 해당한다.

(5) 무등산 지역의 화성암류를 형성시킨 마그마 유형은 맨틀 기원의 마그마에서 분화된 I형(자철석 계열) 및 동시 충돌성화강암(syn-COLG)에 해당한다. 또한 마그마가 분별 결정작용에 의해 점진적으로 분화된 경향을 보인다.

(6) 본역에서 미문상화강암은 단층 또는 열극과 밀접하게 관련되어 분포하는 특성을 고려하면 이러한 약대를 따라 증가하는 증기상의 탈가스화작용 또는 용리작용

용에 의한 과냉각도의 증가가 미문상화강암과 이에 수반된 miarolitic 기공을 형성시킨 주된 요인이었을 것으로 생각된다.

- (7) 본역의 암상 분포, 지구화학적 특성 및 지질 연대 등을 고려할 때, 백악기 중기 및 후기에 Kula판이나 태평양판의 섭입과 관련하여 형성된 대륙 연변분지로 추정되는 영동-광주합몰대의 일부이며, 무등산 지역은 약 80Ma를 전후한 화성 활동에 의해 형성된 함몰체(cauldron)구조를 보인다.

참고문헌

- 권치순, 1987, 대전-공주간에 분포하는 화강암질암류의 지질년대와 암석화학. 연세대학교, 박사학위 논문.
- 김규봉, 이병주, 황상구, 1990, 한국지질도 공주지질도폭 및 설명서(1:50,000). 한국동력자원연구소. 45pp.
- 김봉균, 박병권, 1966. 한국지질도 동북지질도폭(1/50,000). 상공부 국립지질조사소. 30 pp.
- 김옥준, 1971, 남향의 신기화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 제4권 1호, 1-10.
- 김옥준, 1975, 남한의 화강암류와 지각변동. 광산지질 제8권 4호, 223-230.
- 김옥준, 1982, 한국의 지질과 광물자원. 연세대학교 지질학과 동문회, 10pp.
- 김옥준, 박봉순, 1980, 한반도의 지진 지체구조에 관한 연구. 과학기술처, 1-159.
- 김용준, 1988, 보성장천지역에 분포하는 정편마암류의 지질시대와 성인에 대한 연구. 광산지질, 제21권 I호, 69-83.
- 김용준, 김정빈, 1988, 장계-임실간에 분포하는 화성암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 제24권 특별호, 87-110.
- 김용준, 조동통, 박영석, 1989, 거창지역에 분포하는 중생대 화성암류의 K-Ar 연령과 광물의 조성. 광산지질, 22, 117-127.
- 김용준, 박영석, 주승환, 오민수, 박재봉, 1990, 옥천지향사대 동남대에서의 화성 진안 나주 사이 지역을 중심으로. 한국지구과학회지. 제2권 2호, 120-138.
- 김용준, 1991, 옥천지향사대 동남대에서의 화성활동 (Ⅲ) (나주-남창 지역을 중심으로). 광산지질, 24권 3호, 261-276.
- 김용준, 김정빈, 박재봉, 1991, 호남전단대에 분포하는 엽리상화강암류의 암석지화학과 성인. 지질학회지, 제27권 1호, 52-63.
- 김용준, 박영석, 주승환, 오민수, 박재봉, 1991, 옥천지향사대 동남대에서의 화성활동: 나주-남창지역을 중심으로. 광산지질, 24권 3호, 261-276.
- 김용준, 박배영, 신상은, 오민수, 1992, 한반도 서남부에서의 지체구조 발달사에 관한 연구. 전남대학교 지질학과, 한국자원연구소 광상연구부.

- 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 광주화강암체에 대한 암석 화학적 연구. 광산지질, 26권 1호, 83-96.
- 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 나주해남 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학. 한국 지구과학회지, 14권 3호, 300-315.
- 김용준, 박영석, 박천영, 김진, 1995, 나주-영암-목포지역에 분포하는 화성암류의 암석화학과 화성활동에 관한 연구. 한국 지구과학회지, 16권 6호, 442-461.
- 김용준, 이창신, 김희남, 1998, 전주-정읍지역에 분포하는 화성 심성암류의 암석화학과 성인, 한국지구과학회지. 19.권 2호 56-77.
- 김용준, 박재봉, 박병규, 2002, 무등산 지역에 분포하는 화성암류의 암석화학. 한국 암석학회지, 11권 3호, 214-233.
- 김인준, 長尾 敬介, 1992, 한국남서부의 열수점토광상과 주변암에 대한 K-Ar연대측정. 암석학회지, 1권 1호, 58-70.
- 김중환외 8인, 1993, 화산원 천열수성 광상탐사 및 모18정립, 과학기술처. KR-92, p.25, p.209
- 문희수, 김영희, 김중환, 유장한, 1990, 해남지역 화산류의 납석 및 고령토 광상의 K-Ar연대. 광산지질, 23권 2호, 135-141.
- 민경덕, 김옥준, 이재성, 김규한, 1988, 한국 남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 작용성 연구 (II). 지질학회지, 제24권 특별호, 11-40.
- 신인현, 1994, 해남 완도지역의 백악기 화강암류에 대한 암석화학적 연구.
- 신인현, 1998, 영동-광주합몰대에서 중생대 화성활동과 관련된 콜드론구조.
- 주승환 1986, 영남육괴의 Rb-Sr연령측정연구 (제천-단양, 무주-거창지역 화강암질편마암류 및 화강암류의 연령 동력자원연구소. I-M
- 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴의 년대측정연구 2 (지리산 서남부 일대 화강암질편마암 및 편암류 편마암류및 화강암류, 동력자원연구소, KR-86-7, 7-33
- 주승환. 지세정, 1990, 광주화강암의 RbvSr연령측정 연구. 동자연보고서 KR-90"IB"2, 3-54.
- 원종관, 1968, 경상분지에서 백악기 화성활동에 관한 연구 (1). 지질학회지, 4권, 215-236.
- 원종관, 이문원, 김광호, 홍영국, 우준기, 이재만, 1990, 순창합몰대에서의 백악기 화산활동에 관한 연구. 지질학회지, 26권 2호, 165-184.

- 윤성효, 1990, 해남-목포일원의 백악기 화산활동에 관한 연구. 부산대학교 사대논문집, 21권, 275-290.
- 윤현수, 김선익, 1990, 무경 남부 일대에 분포하는 백악기 화강암류의 암석학 및 암석화학. 광산지질, 23권 3호, 343-352.
- 이대성, 1971, 중부 옥천지향사대에 있어서의 화성활동에 관한 연구, 지질학회지, 제7권 3호, p. 153~216.
- 이대성, 이하영, 1976, 한국 서남해안지역에 분포하는 함유물질층에 대한 지질학적 및 지구화학적인 연구. 광산지질 제9권 1호, 45-74.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청)지역의 변성니질암의 변성작용에 관한연구. 지질학회지, 제16권 1호, 1-15.
- 이상만, 김상욱, 1987, 남한의 백악기~제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 제23권 4호, 338-359.
- 장기홍, 1977, 경상분지 상부 중생계의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 제13권 1호, 76-90.
- 장기홍, 1982, 한국의 지질과 광물자원. 연세대학교 지질학과 동문회, 127-128.
- 진명식, 1985, 남한에서 백악기-제3기 화강암의 지화학 : 제1편. 주성분원소 지화학, 지질학회지, 제21권, 297-316.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사산성화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9권 2호, 85-109.
- 차문성, 윤성효, 1988, 한반도의 화산암물 구조 및 환상복합암체에 관한 연구. 지질학회지, 제24권 특별호, 67-86.
- 차문성, 윤성효, 신국성, 1986, 한반도 서남부 영동-광주암물체내의 화산암물체 (1). 운장산암물체, 부산대학교 자연과학논문집, 42, 305-315.
- Ahn, K. S., 2010, Geology and Landscape of Mt. Mudeung Province Park, Korea. Journal of the Petrological Society Korea, 19, 109-121(in Korean with English abstract).
- Ahn, K. S., 2013, Potential as a Geological Field Course of Mt. Geumdang located in Gwangju, Korea. Journal of the Korean Earth Science Society, 34, 235-248(in Korean with English abstract).
- Aramaki, S. and Nozawa, T., 1978, A reference book of chemical data for Japanese granitoids. Contribution from Geodynamic Project of Japan,

78-1, p. 88.

- Barker, D.S., 1970, Compositions of granophyre, myrmekite and graphic granite. Geol. Soc. Ame. Bull., V. 81, 3339-3350.
- Barth, T.F.W., 1962, Theoretical Petrology (2nd Ed.). NEWYORK : Wiley, 416pp.
- Benioff, H., 1954, Orogenesis and crustal structure ; Additional evidence from seismology. Geol. Soc. Am. Bull., 65, 385-400.
- Betchelor, R.A., Bowden, P., 1985, Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters, chemical geology. V. 48, 43-55.
- Bouseily, A.M. and Sokkary, A.A., 1975, The relation between $\frac{Rb}{Sr}$, Ba and Sr in granitic rocks. Chemical geology, V. 16, 207-219.
- Brooks, D.A., Carlson, R.L., Harry, D.L., Meria, P.J., Moore, R.p., Rayhorn, J.E and Tubb, S.G., 1984, Characteristics of back-arc regions. Tectonophysics, 102, 1-16.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comants on magma sources. J. Geol. Soc. London, 141, 413-426.
- Chappel, B. W. and White, A. J. R., 1974, Two contrasting granite types. Pacific Geology, V. 8, 173-174.
- Christiansen, R.L. and Lipman, P.W., 1972, Cenozoic volcanism and platetectonic evolution of the Western United States. II. Late cenozoic, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A. Y. 271, 249-284.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W., 1982, Nature and origin of A-type granites with Particular reference to Southeastern Austraria. Contrib. Min. Petrol., V. 80, 189-200.
- Condie, K.C., 1969, Petrology and Geochemistry of the Laramie Batholith and Related Metarmorphic Rocks of Precambrian Age, Eastern Wyoming. Geol. Soc. Ame. Bull., V. 80, 57-82.
- Condie, K.C., 1973, Archean Magmation and Crustal Thickening. Geol. Soc. Ame. Bull., 84, 2981-2992.
- Czamanske, G.K., Ishihara, S. and Atkin, S.A., 1981, Chemistry of

- Rock-Forming Minerals of the Cretaceous-Paleocene Batholith Southwestern Japan and Implications for Magma Genesis. *Jour. of Geophysical Research*, V. 86, 10431-10469.
- Dickinson, W.R., 1971, Plate tectonic models for orogeny and at continental margins. *Nature (London)*, 232, 41-42.
- Dodson, M.H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological system. *Cont. mineral. petrol.*, 40, 259-274.
- Dupuy, C. and Coulon, C., 1973, Li, Rb, Sr, dans les plagioclases de la suite andesitique du Logudoro et du Bosano, saldaigne nord occidental. *C.r. hebdomadaire de l'Académie des Sciences et belles-lettres de Paris*, 277, 1593-1596.
- Fenn, P.M., 1977, The nucleation and growth of alkali feldspars from hydrous melts. *Can. Mineral.*, 15, 135-161.
- Fenn, P.M., 1986, On the origin of graphic granite. *Am. Min.*, 71, 325-330.
- Goldschmidt, V.M., 1937, The principles of distribution of chemical elements in mineral and rocks. *Jour. Chem. Soc.*, 655-673.
- Griffin, T.J., White A.J.R. and Chappell, B.W., 1978, The Moruya batholith and geochemical contrasts between the Moruya and Jindabyne suites. *Jour. Geol. Soc. Australia*, 25, 235-247.
- Harker, A., 1909, *The natural history of igneous rocks*. New York, Macmillan publishing Co., 384pp.
- Hein, R., Willims, S. W., Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1978, Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko batholith, *Jour. Geol. Soc. Australia*, 25, 235-247.
- Henderson, P., 1984, *Rare earth element geochemistry*. Elsevier Science Pub. Co. Inc. 499pp.
- Hess, P.C., 1989, *Origins of igneous rocks*. Harbard university press, 336pp.
- Hong, Y.K., 1983, *Petrology and Petrochemistry of Jurassic and Cretaceous granites, southern Korea*, unpubl. Ph.D. thesis, Univ. of London, p.365, *Geol. Soc. Australia*, Vol. 25, 219-234.
- Huh, M., Ahn, K.S., Kim, J.B., Son, Y.K., Kil, Y.W., Lee, C.Y., Kim, H.J., Park, S.p., Oh, J.J., Choi, B.D., Woo, Y. and Park, J.Y., 2013, *Geological and*

- geographical heritage of Mudeungsan geopark. Gwangju city, 278pp. (in Korea)
- Huh, M., Paik, I.S., Chung, C.H., Hwang, K.G. and Kim, B.S., 2003, Theropod tracks from Seoyuri in Hwasun, Jeollanamdo, Korea: occurrence and paleontological significance. *J. Geol. Soc. Korea*, 39, 461-478
- Huh, M., Paik, I.S., Chung, C.H., Hwang, K.G. and Kim, B.S. and Kwak, S.K. 2006, Well-preserved theropod tracks from the Upper Cretaceous of Hwasun County, southwestern South Korea, and their paleobiological implications. *Cretaceous Reserch*, 27, 123-138.
- Iddings, J.P., 1892, The origin of igneous rocks, *Wash. Philos. ssoc. Bull.*, V. 12, 89-124.
- Irvine, T.N., Barager, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canada Jour. Earth*, Vol. 8, 523-548.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, V. 27, 293-305.
- Jahns, R.H., Martin, R.F. and Tuttle, O.F., 1969, Origin of granophyre in dikes and sills of tholeiitic diabase (abs.). *Am. Geophys. Union Trans.*, 50, 337pp.
- Jin, M.S., 1980, Geological and isotopic contrasts of Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 16, 205-215.
- Jin, M.S., 1985, A relationship between tectonic setting and chemical composition of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol. 21, No. 2, 67-73.
- Jin, M.S., 1988, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea : Part II. Trace elements geochemistry. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 34, Spec. Issue, 168-188.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee, J.S., 1981, Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin, Korea. *Mining Geol.*, 31, 245-260.
- Johnson, J. S., Mutchler, F.E., and Barr, D., 1976, Granites and granites-astatistical investigation of Paleo stress gauges. *Geol. Soc.*

Am., Abstract Programs, V. 8, 943pp.

- Jwa, Y.J., 1990, Petrography and major element geochemistry of the granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, 85, 98-112.
- Kagami, H., Iwata, M., Sano, S., and Honma, H., 1987, Sr and Nd isotopic compositions and Rb, Sr, Sm and Nd isotopic concentrations of standard samples. Technical Rep. of ISEI. Okayama Univ., Ser, B, p. 16.
- Kim, B. G., Park, B. G., 1966, Geological report of the Dongbok sheet(1:50,000). Geological Survey of Korea, 33 p (in Korean with English abstract).
- Kim, I. J., 1991, Geochemistry of hydrothermal alteration and clay deposits in the Haenam Area, Southwestern Korea. Thesis of Ph.D. Univ, of Tokyo.
- Kim, S. W., 1986, Late Cretaceous igneous activities in the Gyeongsang Basin. Memorial for Prof. Lee, S.M. 's 60th Birthday, 167-194.
- Koto, B., 1909, Journeys through Korea (First contribution). *J. Coll. Sci. Imperial Univ. Tokyo*, 26, 207pp.
- Lee, J. I., 1991, Petrology, Mineralogy and Isotope of the Shallow-depth Emplaced Granitic Rocks, Southern Part of the Kyoungsang Basin, Korea. Univ. of Tokyo, Ph.D. thesis.
- Lee, S. M., 1974, The Tectonic setting of Korea with relation to Plate tectonics. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 10, 25-26.
- Lee, S. M., 1979, A relative study on plutonism and mineralization in Korea. MOST, R-74-48.
- Lee, S. M., and Lee, S. H., 1982, Petrogenetic and petrochemical approaches to ore genesis in Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 18, 203-214.
- Martin, R. F., Piwinski, A. J., 1972, Magmatism and tectonic settings, *J. Geophys. Res.*, V. 77, 4966-4975.
- Mason, B., Moore, C. B., 1982, Principles of geochemistry, John Wiley and Sons. Inc. Newyork. 104-216.
- Nakamura, N., 1974, Deformation of REE, Ba, Fe, Mg, Na and Ca in carbonaceous chondrite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 757-775.
- Nishimura, S., Mogi, T., 1986 The interpretation of discordant ages of some

- granitic bodies, *Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan.* 8, 145-164.
- Oh, J. J., 2012, Study on the Debris Geomorphology in Mt. Mudeung. Ph. D. thesis, Chonnam National University, Gwangju, 153 p(in Korean with English abstract).
- Peacock, M. A., 1931, Clasification of igneous rock series, *Jour. Geol.*, 39, 54-67
- Pearce. J. A., Harris, N. B. and Tindle, A. G., 1984, Tracc element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, 956-986.
- Pearce. J. A., Harris, N. B. and Tindle, A. G., 1984, Tracc element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks, *J. Petrol.*, 956-986.
- Petro, W. L., Vogel, T. A., Wilband, J. T., 1979, Major element chemistry of plutonic rocks from copressional and extentional plate boundaries, *Chem. Geol.*, V. 26, 217-235
- Pitcher, W. S., 1982, Granite type and tectonic environment, In : K. J. Hsu(editor), *Mountain Building Processes*, Academic Press, London, 19-40
- Rahaman, M. A., Emofurieta, W. O., Caen-Vachette, M., 1983, The Potassic-granites of the igbeti area : Further evidence of the polycyclic evolution of the pan-african belt in south-western Nigeria, *precambrian Res.*, V. 22, 75-82
- Ringwood, A. E., 1955, The principles governing trace element distribution During magmatic crystallization, Part 1 : The influence of electron negativity, *Geochim. Cosmochim.* V. 7, 189-202
- Shibata, K., 1991, K-Ar ages and closure temperature of potassium feldspar, *Chishitsu News*, 437, 7-14 (in Japanese).
- Strong, D. F., Minatids, D. G., 1975, Geochemistry and tectonic setting of the late Precambrian Holyrood plutonic series of eastern Newfoundl and *Lithos*, V. 8, 283-295
- Swanson, S. E., Fenn, P. M., 1986, Quartz crystallization in igneous rocks, *Am. Mineral.*, 71, 331-342

- Tarney, J., Saunders, A. D., 1979, Trace element constraints on the origin of Cordillerran Batholiths, Shiva Pub. Ltd., 90-105
- Taylor, H. P. Jr., 1968, The Oxygen isotope geochemistry of igneous rocks, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 19, 1-71
- Taylor, S. R., 1964, Abundances of Chemical element in the Continental crust, *Geochim. Coschim. Acta*, V. 28, 1280-1281
- Taylor, S. R., 1965, The application of trace element data to problems petrology, *Physics and chemistry of the earth*. V. 6, 133-213
- Tindle, A. G., Pearce, J. A., 1983, Assimilation and partial melting of continental crust ; evidence from the mineralogy and geochemistry of autoliths and xenoliths, *Lithos*, V. 16, 185-202
- Tsusue, A. and Ishihara, S., 1974, The iron-titanium oxides in the granitic rocks of southwstern Japan. *Mining Geol.*, 24, 13-39.
- Uyeda, S. D., Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the japanese islands, *A Synthesis*, GSA Bull., V. 8, No. 2.
- Van Breeman, O., Pidgeon, R. T., Bowden, P., 1977, Age and isotopic studies of some Pan-African granites from north-central Nigeria, *Precambrian Res.*, V. 4, 307-319
- Vlasov, K. A., 1966, Geochemistry and mineralogy of rare elements and genetic type of their deposits, *Israel program for scientific translations Ltd.*, p. 688.
- Wager, L. R., Mitchell, R. L., 1951, The distribution of trace elements during strong fractionation of basic magma, *Geochim. Cosmo. Acta*. V. 1, 129-208
- Wagner, G. A., Reimer, G. M., Jger, E., 1977, Cooling ages derived by apatite fission track, mica Rb-Sr and K-Ar dating : the uplift and cooling history of the Central Alps, *Mem. Deg. Inst. Geol. Min. Univ. Padova*, 30, 1-27
- Westrich, H. R., Stockman, H. W., Eichelberger, J. C., 1988, Degassing of rhyolitic magma during ascent and emplacement, *J. Geophys. Res.*, 93, 6503-6511
- Wright, J. B., 1969, A Simple alkalinity tatio and its application to questions of non-orogenic granite genesis, *Geol. Mag.* V. 106, 370-384

감사의 글

논문 원고를 마무리 하는 이 순간에 눈앞에 떠오르는 얼굴들이 참 많습니다. 생각해 보면 참으로 많은 분들의 도움이 있었기에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 여기 이 감사의 글이 도움을 주신 모든 분들께 제가 느끼는 감사의 마음을 충분히 전할 수 있다면 좋겠습니다.

우선 여러 해 동안 지켜봐주시고, 논문을 구상할 때부터 최종 마무리를 할 때까지 아낌없는 지도와 도움을 아끼지 않으시고 항상 격려와 충고로 이끌어주신 신인현 교수님께 한없는 존경과 감사드립니다. 또 논문을 마무리할 수 있도록 도와주신 심사위원장 안건상 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 중간 중간 논문을 완성할 수 있게 도와주시고 항상 따뜻한 말씀과 아낌없는 격려와 조언 주셨던 류찬수 교수님, 그리고 지금 까지 지켜봐주신 조주환 교수님, 김희남 교수님께도 감사드립니다. 또한 논문의 심사과정에서 수고해주신 박천영 교수님, 자료 분석에 힘써주신 한국기초과학지원연구원의 정연중 박사님의 노고와 지도에도 감사드립니다. 이 논문이 완성되기까지 자료 수집과 제작에 도움을 준 광주인성고등학교의 김형래 선생님, 무등산 관리사무소의 양현삼 후배님, 박편제작과정에 도움을 준 최원영 후배님에게도 감사드립니다.

그리고 항상 옆에서 자리를 지켜주고 격려해주고 필드 촬영이나 샘플 채취 시 동반해서 도와준 아내 정미정과 묵묵히 뒤에서 응원해준 인웅, 명길 두 아들들도 고맙고 마지막으로 이 자리가 있기까지 후원해준 누나들에게도 고맙다는 말을 전합니다.

그 밖에도 지면을 빌어 감사를 드려야 할 분이 수 없이 많습니다. 비록 일일이 감사를 표하지 못하더라도 베풀어주신 따뜻한 성원과 격려에 깊은 감사를 느끼고 있음을 전하고 싶습니다.