

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 지질: I. 층서 및 구조

김인준* · 기원서 · 송교영 · 김복철 · 이사로 · 이규호

한국지질자원연구원, 지질기반정보연구부

Geology of the Kualakulun in the Middle Kalimantan, Indonesia: I. Stratigraphy and Structure

In-Joon Kim*, Won-Seo Kee, Kyo-Young Song, Bok-Ghul Kim, Sa-Ro Lee and Gyoo Ho Lee
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The geology of the Kualakulun area in Middle Kalimantan, Indonesia comprises Permian to Carboniferous Pinoh Metamorphic Rocks and Cretaceous Sepauk Plutonics of the Sunda Shield, late Eocene Tanjung Formation, Oligocene Malasan Volcanics, Oligocene to early Miocene Sintang Intrusives and Quaternary alluvium. Tanjung Formation was deposited in low- and high-sinuosity channel networks developed on the proximal to distal delta plain and delta front forming southward paleoflow system, which, in turn, gradually change into shallow marine environment. Four main deformational phases are recognized: D1, folding of metamorphic rocks accompanied by development of S1 schistosity under regional metamorphic condition; D2, ductile shearing in Cretaceous granitoids; D3, folding of metamorphic rocks accompanied by S2 crenulation cleavage; D4, faulting under N-S compressional regime during Tertiary times, producing NE-trending sinistral and NW-trending dextral strike-slip faults and N-S to NNE-trending normal faults.

Key words : Indonesia, paleoflow system, deformational phases

인도네시아 중부 칼리만탄 쿠알라쿠룬 지역의 지질은 하부로부터 석탄-페름기의 피노변성암류, 백악기 세파옥심성암류, 에오세말기의 탄중층과 올리고세의 말라산화산암류로 구성되며, 올리고세-마이오세초기의 신탕관입암류가 상기한 모든 지층들을 관입하고 있다. 퇴적층인 탄중층은 전체적으로 북쪽으로부터 남쪽으로 발달하는 고수류계를 유지하는 삼각주 환경과 천해 해저 환경에서 퇴적되었다. 고생대 후기의 변성퇴적암류가 퇴적된 이후부터 발생한 4회의 변형작용이 인지된다. D1 변형작용은 광역변성작용을 수반한 변성암류의 습곡작용 및 S1 편리구조 형성으로 특징 지워진다. D2 변형작용은 백악기 화강암질암 내에 발생한 연성전단작용이며, D3 변형작용은 북동 내지 동북동 방향의 축을 갖는 습곡작용 및 이에 수반된 S2 파랑벽개의 형성으로 정의된다. D4 변형작용은 제3기 동안 남-북 방향의 압축 응력하에서 발생한 단층작용으로서, 북동 방향의 좌수향 주향이동단층, 북서 방향의 우수향 주향이동단층, 남-북 내지 북북동 방향의 정단층 등이 형성 되었다. 이 단층작용은 제3기 지층의 퇴적과 분포에 영향을 끼친 것으로 해석된다.

주요어 : 인도네시아, 고수류계, 탄중층, 변형작용

1. 서 론

조사지역은 칼리만탄의 중앙의 카하얀강(Kahayan River)과 카푸아스강(Kapuas River) 사이의 지역에 자리하고 있으며, 경위도상으로는 동경 113°25'-114°01' 및 남위 0°43'-1°07'에 해당하는 지역으로서 그 면적은 약

1,845 km²에 이른다(Fig. 1). 이 지역은 지체구조적으로 석탄-페름기의 순다순상지의 동남 연변부에 해당하며, Central Kalimantan Arc 내에 자리한다.

이 지역 대한 지질조사는 1975년부터 1978년까지 인도네시아 지질조사소(GSD)와 JICA-MMAJ가 공동으로 이 지역에 배태된 광상을 탐사할 목적으로 처음으로

*Corresponding author: ijkim@kigam.re.kr

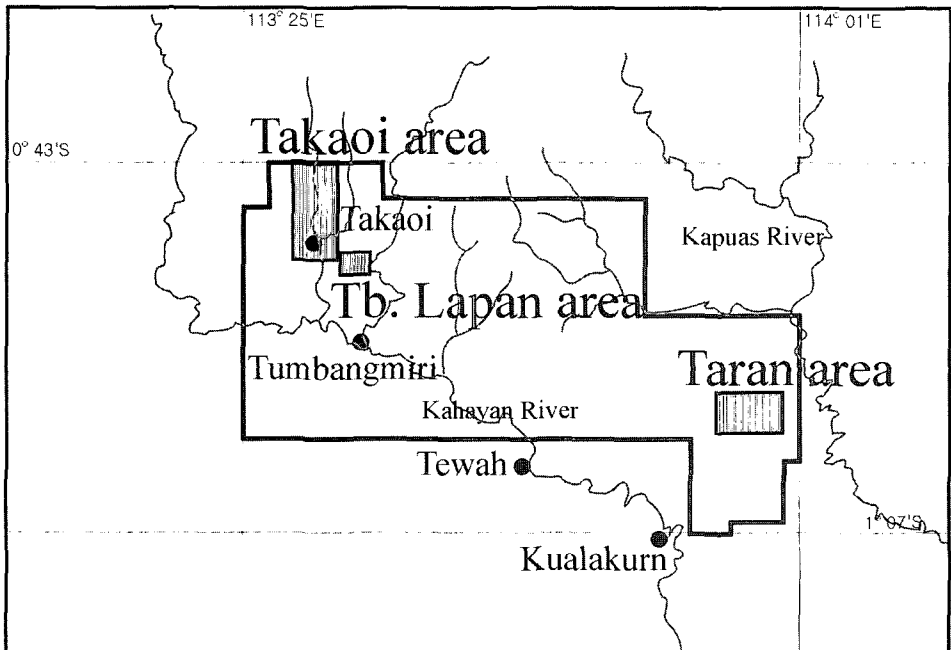
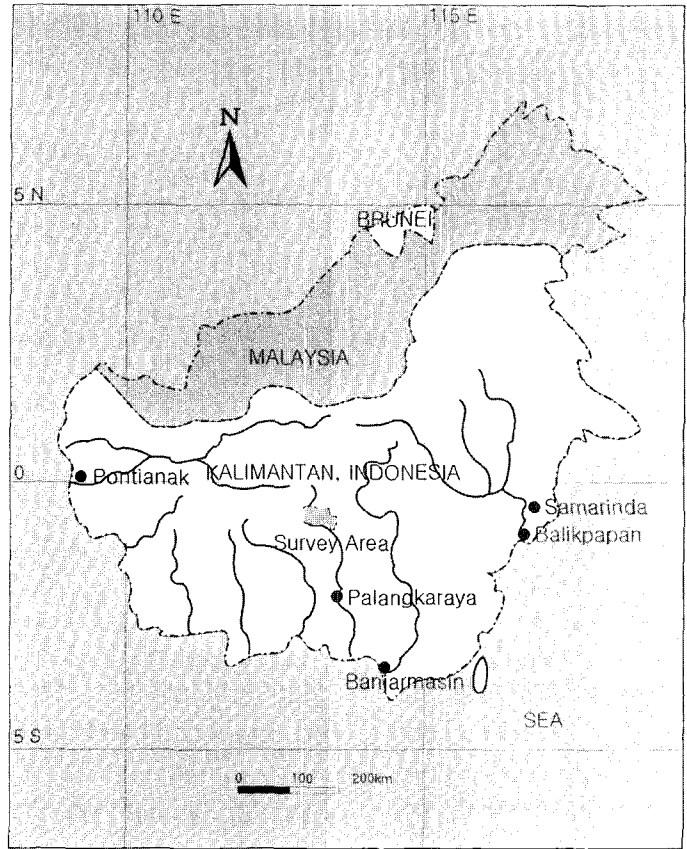


Fig. 1. The location map of study area on central Kalimantan, Indonesia.

로 수행되었다. 이 조사에서는 위성자료 및 항공사진 해석, 그리고 항공자력탐사가 수행되었으며, 이와 더불어 조사지역의 서부를 포함한 일부 지역에 대해 지표지질 조사와 지구화학 및 방사능탐사가 병행된 바 있다 (Ministry of Mines and Energy *et al.*, 1977, 1978a, 1978b, and 1979). 그 후 BP Minerals에서 1986-1989년에 걸쳐 이 지역에 배태된 금광상에 대한 탐사를 수행하였으며, 1996부터 1997년까지는 Barrick Gold Corporation이 지질 및 광화작용에 대해서 보다 자세한 연구를 수행한 바 있다 (Bugg *et al.*, 1998).

조사지역은 인도네시아의 지질연구개발센터 (GRDC)에서 발간한 1:250,000 축척의 지질도폭인 Buntok (Suetrisno *et al.*, 1994), Muarotewe (Supriatna *et al.*, 1995), Tumbanghram (Margono *et al.*, 1995), Tewah (Sumartadipra and Margono, 1996) 등의 도폭지역에 걸쳐 위치한다. 본 연구에 사용된 각 암체 및 지층명들은 이들 도폭으로부터 인용하였다.

야외지질조사를 통해 조사지역에 분포하는 지질의 구성암석, 층서, 분포범위, 상호관계, 지질구조 등에 대한 자료를 수집하였으며, 이 조사 결과와 기존 자료들을 종합 분석하여 1:100,000 축척의 지질도를 편집 제작하였다.

2. 층 서

조사지역은 각 종 편암 및 천매암과 같은 변성퇴적암류로 이루어진 석탄-페름기의 피노변성암류 (Pinoh Metamorphic Rocks)를 최하위 지층으로하여 각종 화강암질암으로 구성된 백악기 세파옥심성암류 (Sepauk Plutonics)가 제3기 분지의 기반암을 형성하면서 분포한다. 제3기 분지는 에오세말기의 탄중층 (Tanjung Formation)과 올리고세의 말라산화산암류 (Malasan Volcanics)로 충전되어 있으며, 올리고세-마이오세초기의 신탕관입암류 (Sintang Intrusives)가 상기한 모든 지층들을 관입하고 있다. 말라산화산암류는 North Borneo subduction zone에 수반된 화산암류로서 북동방향으로 발달하는 Central Kalimantan Arc의 일부를 형성하고 있다. Central Kalimantan Arc는 광화작용의 모임을 이루고 있는 것으로 알려져 있다. 미고결 쇄설성퇴적물로 구성된 제4기 충적층은 현 하상이나 하안 및 계곡을 따라 주로 분포한다 (Fig. 2).

2.1. 석탄-페름기 피노변성암류

피노변성암류는 조사지역의 최고기 기저암으로서, 주

로 석영운모편암, 운모편암, 규암, 천매암 등으로 구성되며, 각섬석편암을 일부 협재한다. 이 변성암류는 따까오이 (Takaoui) 북부와 뚝방함푸통 (Tb. Hamputung) 서부 지역에 이들을 관입한 백악기의 화강암질암과 함께 분포하며, 태와 (Tewah) 지역으로부터 북동쪽으로 동북동-서남서 방향의 대상체를 이루며 분포하고 있다. 1970년대 후반에 수행되었던 JICA-MMAJ의 연구보고서 (Ministry of Mines and Energy *et al.*, 1979)와 Tumbanghram 도폭 (Margono *et al.*, 1995)에 의하면 이 지역에 분포하는 피노변성암류의 지질시대는 고생대 석탄-페름기로 보고되어 있으나, 아직까지 이 지층의 정확한 지질시대를 지시할만한 결정적인 증거는 발견되지 않은 상태이다. 그리고 이 지층은 페름말에서 쥐라기말 사이의 시기에 광역변성작용을 겪었다고 보고되어 있다 (Ministry of Mines and Energy *et al.*, 1979; JICA, 1979). 따까오이 북부지역에 분포하는 변성암체는 주로 운모편암 및 견운모석영편암으로 구성되어 있으며 (Fig. 3a), 엽리의 주향은 대체로 동북동 방향이고 경사는 남쪽 또는 북쪽으로 완만하거나 급한 경사를 이루고 있어 습곡구조의 존재를 암시한다. 그리고 따까오이 인근의 벌목회사 주변 지역에서는 화강암질암의 관입을 받아 루프펜던트나 대규모 포획체를 형성하면서 구릉의 정상부에 독립적으로 잔류되어 분포하고 있는 것이 여러 곳에서 관찰된다. 태와의 북동부 지역에서부터 동북동-서남서 방향으로 협장하게 대상분포하는 변성암체는 사질 천매암 함께 암회색 내지 회색의 이질 천매암 혹은 점편암으로 구성되어 있는 것이 특징이다. 암회색의 이질 천매암은 견운모 및 석영과 함께 흑연으로 구성되어 있다. 그리고 이 지층의 상위에 제3기 퇴적암류 (탄중층)가 직접 피복하고 있는 부정합면이 여러 곳에서 관찰된다. 조사지역의 서부에 분포하는 변성암의 경우 대부분이 편리의 발달이 현저한 석영운모편암이다. 편암은 주로 흑운모, 백운모로 구성된 우후대와 석영, 장석으로 구성된 우백대가 대체로 규칙적으로 배열하고 있으며, 일부 우후대 내에는 주엽리면 형성 이후에 (post-tectonic) 성장한 백운모 변정이 관찰되기도 한다. 일부 편암의 경우 석류석이 관찰되며 (Fig. 3b), 또한 흑운모 및 백운모의 가장자리를 따라 세립의 규선석이 발달하기도 한다. 이 밖에 편암 내에는 일부 각섬암 혹은 각섬석편암이 관찰되기도 하는데, 이 암석은 주로 각섬석과 사장석으로 구성되며, 소량의 석영을 포함한다. 이 밖에 녹니석 및 녹염석이 2차 광물로 소량 산출한다.

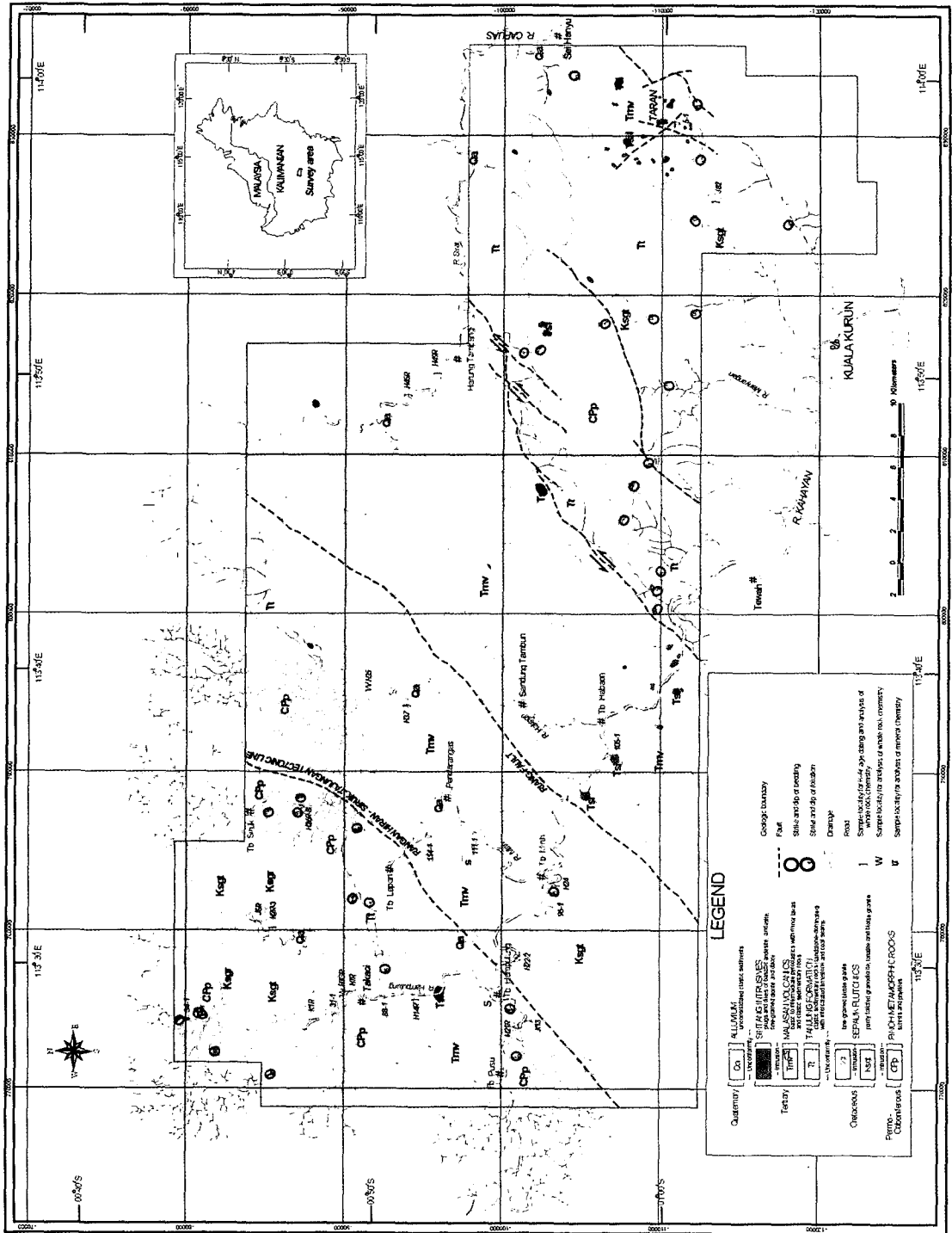


Fig. 2. Geological map of the project area, Central Kalimantan, Indonesia.

2.2. 백악기 세파옥심성암류

이 암체는 기존에 세파옥토날라이트(Sepauk Tonalite)

라고 명명되었던 것이다(Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996). 그러나 조사지역 내의

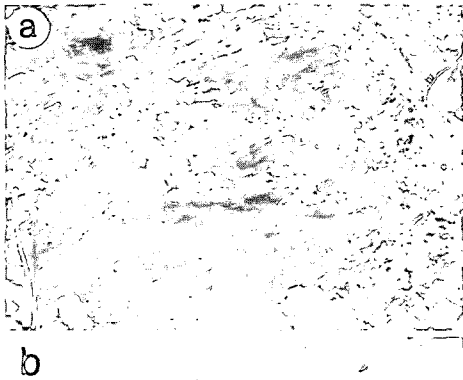


Fig. 3. Pinoh Metamorphic Rocks. (a) Outcrop photograph of mica schist, about 5 km northeast of Tb. Lapan. (b) Photomicrograph of garnet-bearing schist. Field of view about 2 mm across.

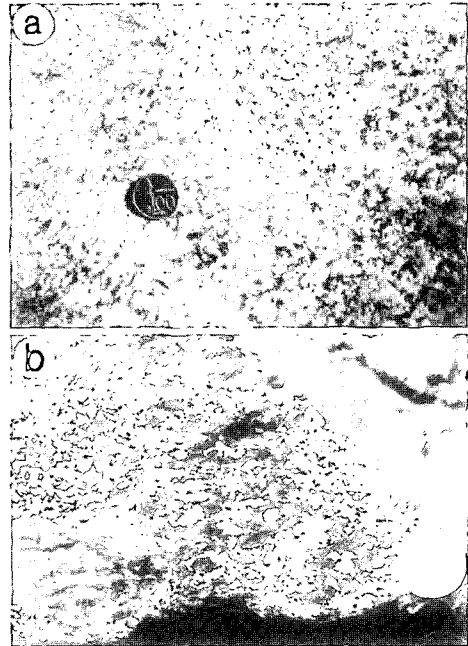


Fig. 4. Outcrop photographs of the Sepauk Plutonics. (a) Massive, medium-grained biotite granite, about 4 km north of Takaoi. (b) Foliated, medium-grained granodiorite, about 12 km north of Takaoi.

이 암체는 토날라이트 뿐만아니라 화강섬록암 및 흑운모화강암 등의 다양한 화강암질암으로 구성된 심성암복합체로 나타나며, 이들 암석 중 화강섬록암이 가장 넓은 분포를 보인다. 그리고 일부 지역에서는 섬록암 및 각섬석암이 소규모로 분포한다. 따라서 이 보고서에서는 이들 암체에 대해 세파옥심성암류(Sepauk Plutonics)라고 칭하고자 한다. 연대측정 연구결과에 의하면 이들 암체의 K-Ar 전암 연령은 대략 89-106 Ma로서 모두 백악기의 심성암체로 밝혀진 바 있다. 화강암질암으로 주로 구성된 이 암체는 뚝방미리(Tb. Miri)를 중심으로 조사 지역의 서남부 지역과 북서부의 따까오이 지역에 피노변성암류를 관입하며 분포하고 있다. 이들 화강암질암은 야외 산상에 따라 부분적으로 변형을 받은 중립질 화강암질암과 이를 관입한 세립질 흑운모화강암으로 구분할 수 있으며, 세립질 흑운모화강암이 보다 후기의 암체로 확인된다. 그리고 중립질 화강암질 암내에는 각섬석과 섬록암이 극히 소규모로 분포하는데 뚝방미리 및 타란 부근에서 관찰된다.

2.2.1. 중립질 화강암질암

중립질 화강암질암은 대부분 화강섬록암과 토날라이트

트로 구성되어 있으나, 이들 암체간의 경계는 접근 가능한 지역이 매우 제한적이고 노두발달 역시 불량하여 그분포를 명확히 구분하기가 매우 어렵다. 야외에서의 육안관찰에 의하면 이 암석들은 중립 내지 조립질의 석영, 장석, 흑운모, 각섬석 등으로 구성되어 있고, 완정질의 등립조직을 가진다(Fig. 4a). 따까오이 북부 및 뚝방미리 부근에서는 부분적으로 약한 연성변형작용을 받아 엽리조직을 갖는 변형 화강암으로 나타나며, 엽리조직은 흑운모나 각섬석 같은 우후질 광물이 정향배열을 이루어 비교적 뚜렷하게 관찰된다(Fig. 4b). 엽리조직은 부분적으로 강하게 나타나 대부분의 지역에서 엽리면의 방향성을 측정하기 어려울 정도로 약하게 발달되어 있다. 엽리의 주향은 대체로 북동 내지 동북동 방향이 우세하며, 경사는 남동쪽 또는 북동쪽으로 중간 내지 고각을 이룬다. 현미경하에서 중립질 화강암질암은 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬석 및 흑운모가 주구성광물로 관찰되며(Fig. 5), 녹염석, 불투명광물, 스펀, 갈염석, 인회석, 저어콘이 소량 나타나고, 녹니석과 견운모는 변질로 인한 2차 광물로 출현한다. 사장석은 자형의 주상 내지 반자형의 판상 결정으로서, 토날라이트에서는 주상이 많고 화강섬록암에서는 상대적으로

관상이 혼다. 흔히 사장석은 동심원상의 누대구조를 보이는데, 외연부는 넓고 연속적인 정상 누대구조를 갖고 내부는 파동형의 좁은 누대구조가 잘 발달한다. 사장석의 중심부는 흔히 견운모로 변질되어 있다. 석영은 타형의 결정 혹은 사장석과 유색광물의 간극을 충전하는 양상을 보이며, 일부 변형작용을 받은 시료에서는 미약하게 재결정되거나 파동소광을 보인다. 일칼리장석은 쌍정이 발달하지 않은 정상석이며, 대부분 간극 충전 혹은 타형으로 존재한다. 큰 결정은 공존하는 다른 광물을 포유하여 바다와 섬 조직을 보인다. 각섬석은 녹갈색에서 녹색의 다색성을 나타내고, 사장석,

석영, 불투명광물, 흑운모를 포유하는 경우가 많다. 흑운모는 황갈색에서 진한 녹갈색의 다색성을 보이고, 부분적으로 녹니석화되어 있다. 일부 변형된 시료에서는 만곡된 벽개의 흑운모가 관찰된다. 녹염석은 흔히 유색광물과 수반하면서 일부는 흑운모와 자형으로 접하는 마그마 기원의 양상을 나타낸다. 세 개의 시료에 대해 실시한 모드 분석비는 이들이 심성암의 분류에서 토날라이트 내지 화강섬록암 영역에 속함을 지시한다 (Table 1, Fig. 6).

2.2.2. 세립질 흑운모화강암

세립질 흑운모화강암은 조사지역의 북서단부에 위치한 따까오이의 북부 일대에서 중립질 화강암질암과 변성암류를 관입하며 분포하고 있다. 이 암체는 소규모의 암맥상으로 나타나며 (Fig. 7a), 서북서 내지 북서 방향의 주관입 방향을 보이면서 집중적으로 분포한다. 육안관찰에 의하면 세립의 석영, 장석, 흑운모로 구성

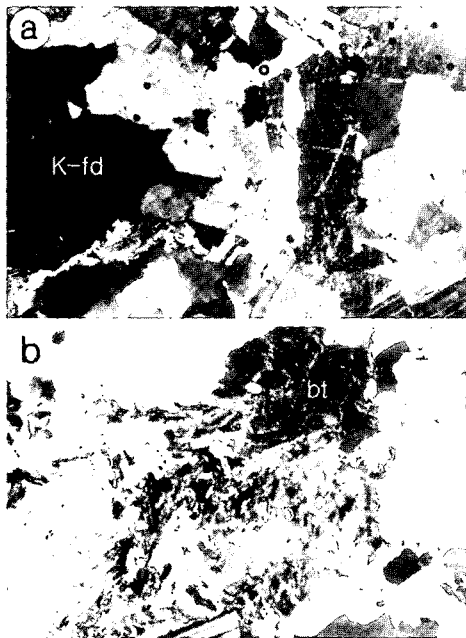


Fig. 5. Photomicrographs of the Sepauk Plutonics. (a) Biotite granite. (b) Tonalite. (bt: biotite, qtz: quartz, K-fd: K-feldspar, pl: plagioclase, hb: hornblende, ep: epidote). Field of view about 2.2 mm across.

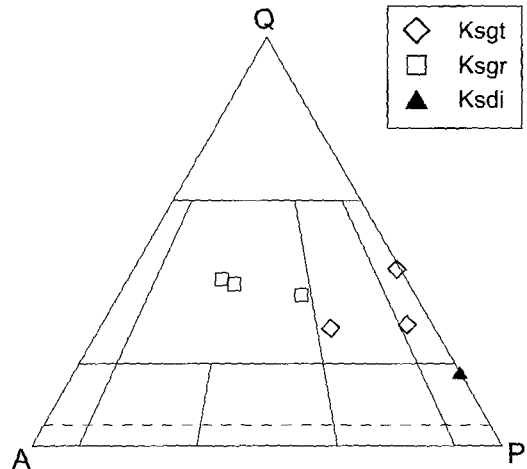


Fig. 6. Q-A-P (Quartz-Alkali feldspar-Plagioclase) diagram for the plutonic rocks from the project area.

Table 1. Modal composition (vol. %) of the plutonic rocks from the study area.

Sample No.	Ksqt			Ksgr			Ksdi
	H21R	H-24	K1R	J5R	H2R-3	K13	J82
Quartz	38.8	22.5	22.8	37.8	38.7	34.2	5.6
K-feldspar	0.7	4.1	17.5	35.6	37.3	22.4	-
Plagioclase	50.4	49.5	39.1	22.3	19.2	36.1	25.7
Biotite	6.1	11.9	7.4	3.4	3.8	5	0.2
Hornblende	2.7	6.6	9.8	-	-	-	64.2
Muscovite	-	-	-	0.6	0.4	0.1	-
Accessory	0.9	4.7	2.3	0.2	0.3	2.1	1.1
Opaque	0.4	0.7	1.1	0.1	0.3	0.1	3.2

된 독립질조직을 보이며, 중립질 화강암질암에서 흔히 관찰되는 뚜렷한 엽리구조는 발달하지 않는다. 이 암석은 중립질 화강암질암과는 다른 조직 또는 지화학적 특성을 보이는데, 중립질 화강암류에 비해 보다 뚜렷이 구별되는 세립의 입도를 보여주어 야외에서 쉽게 구별이 가능하며, 화학분석 결과에 의하면 화학적 특성 또한 보다 산성의 성분을 갖는 것으로 나타났다. 이 암석의 K-Ar 전암연령은 대략 104-106 Ma로서 중립질 화강암질암보다 약간 더 오래된 것으로 추정되었다. 그러나 이것은 이 암체가 중립질 화강암질암을 관입하고 있는 분명한 야외관찰 증거와 상반되는 것으로서 절대연령 측정과정에서 약간의 오류가 있었음을 반영한다. 현미경관찰에 의하면 세립질 화강암은 중립 내지 세립의 알칼리장석(미사장석), 사장석, 석영과 흑운모로 주로 이루어지고, 소량의 백운모, 녹염석, 스펀, 저어콘, 모나자이트를 포함한다(Fig. 7b). 사장석은 자형의 주상과 반자형의 판상 결정으로 이루어지며, 판상 결정은 중심부에 동심원상의 누대를 잘 보인다. 일부 사장석의 중심부는 견운모화되어 있다. 석영과 접하는 사장석의 외면부에는 종종 밀메카이트가 발달한다. 석영은 사장석에 대해 타형으로 존재하며, 작은 입

자의 다결정으로 주로 출현한다. 알칼리장석은 격자쌍정이 뚜렷한 미사장석으로서 사장석과 석영의 간극을 충전하는 유형으로 존재하며, 큰 결정은 공존하는 모든 종류의 광물을 포유하는 포이킬리틱 결정이다. 흑운모는 연한 황갈색에서 진한 녹갈색의 다색성을 보이고, 드물게 벽개면을 따라 녹니석화되어 있다. 일부 시료의 흑운모는 주상의 사장석과 더불어 정향으로 배열하는 경향을 보여 미약한 엽리를 이룬다. 백운모는 대부분 흑운모를 치환하는 작은 입자 혹은 변질된 사장석 내에 존재하는 이차 기원이지만, 일부는 자형으로 공존하는 흑운모와 유사한 입도를 보이는 마그마 기원의 양상을 나타낸다. 녹염석은 흑운모와 밀접하게 수반하며 때로는 이와 자형으로 접한다. 스펀은 자형의 능면체 혹은 타형의 용식된 결정으로 미량 출현하나, 특징적으로 한 시료(K13)에서는 약 1.3% 정도의 모달비를 점한다. 저어콘과 모나자이트는 흑운모에 포유된 미립체이며, 특징적인 헤일로(halo)를 잘 나타낸다.

2.2.3. 섬록암과 각섬석암

섬록암은 괴상의 중립조직을 보이며, 각섬석, 사장석, 석영, 불투명광물, 스펀으로 구성된다(Fig. 8a). 각섬석



Fig. 7. Sepauk Plutonics. (a) Outcrop photograph and (b) photomicrograph of fine-grained biotite granite, about 8km north of Takaoi. Note the plagioclase showing a zonal structure (bt: biotite, qtz: quartz, K-fd: K-feldspar, pl: plagioclase). Field of view about 2 mm across.

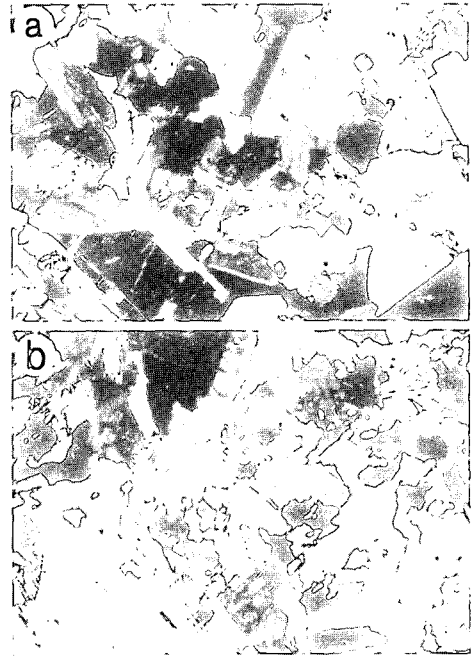


Fig. 8. Photomicrographs of the Sepauk Plutonics. (a) Diorite. (b) Hornblende (pl: plagioclase, hb: hornblende, ep: epidote, sp: sphene, chl: chlorite). Field of view about 2.2 mm across.

은 자형 내지 반자형의 짧은 주상 결정으로서, 연한 녹색 내지 갈녹색의 다색성을 보이며, 일부 큰 입자는 세립의 자형 사정석과 반자형의 불투명광물을 다수 포유하는 포이킬리틱 입자이다. 드물게 각섬석은 녹니석으로 변질되어 있다. 사장석은 자형의 주상 혹은 각섬석에 대해 타형인 판상의 반자형 결정이다. 석영은 사장석과 각섬석의 간극을 채우는 타형 결정이며, 일부 큰 입자는 세립 주상의 사장석을 포유한다. 불투명광물은 대부분 각섬석에 포유된 반자형의 황화광물이고, 스펀과 수반하는 티탄철석도 미량 발견된다. 스펀은 각섬석에 산점상으로 포유된 반자형 또는 사장석과 각섬석 사이를 채우는 타형의 입자이다. 한 시료에 대한 모드 분석비는 이들이 심성암의 분류에서 석영섬록암 영역에 속함을 나타낸다(Table 1, Fig. 6). 각섬석암은 괴상의 조립질 입상조직을 보이며, 소량의 흑운모와 불투명광물을 제외하면 거의 순수한 각섬석으로 구성된다(Table 1, Fig. 8b). 각섬석은 연한 녹색에서 갈녹색의 다색성을 띠며, 벽개면을 따라 드물게 녹염석과 녹니석으로 변질되어 있다. 흑운모는 각섬석에 타형으로 혹은 이에 포유된 세립질 입자로서 대부분 녹니석화되어 있다. 불투명광물은 드물게 미립으로 각섬석 내에 분포한다.

2.3. 제3기 지층

조사지역의 제3기 암석은 탄중층, 말라산화산암류, 신탕관입암류 등, 세 개의 층서단위로 대별된다. 이들 중 제일 하부는 탄중층으로서 사암이 우세한 쇄설성 퇴적암류로 구성되고 이에 석탄층과 석회암이 협재된다. 말라산화산암류는 주로 중성의 화산암류로 구성되어 있으며, 일부 지역에서 쇄설성 퇴적암이 협재하여 분포한다. 상기 지층들을 관입하고 있는 최후기의 신탕관입암류는 플러그(plug) 또는 암맥상의 산상을 보이며, 현무암에서 안산암에 이르는 다양한 성분을 갖는다.

2.3.1. 탄중층

조사지역의 남부 및 동남 연변부가 포함되어 있는 축척 1:250,000 Tewah도폭에서는 이 지역내에 분포하는 제3기 퇴적암류를 하부에서부터 상부로 가면서 에오세의 탄중층(Tanjung Formation), 올리고세의 몬탈라트층(Montalat Formation), 마이오세의 와루킨층(Warukin Formation) 등의 세 개의 지층으로 세분한 바 있다(Sumartadipura and Margono, 1996). 그러나 조사지역의 분포하는 제3기층은 노두발달 상태가 불량하고, 비슷한 암상으로 주로 구성되어 있어 층의 경계

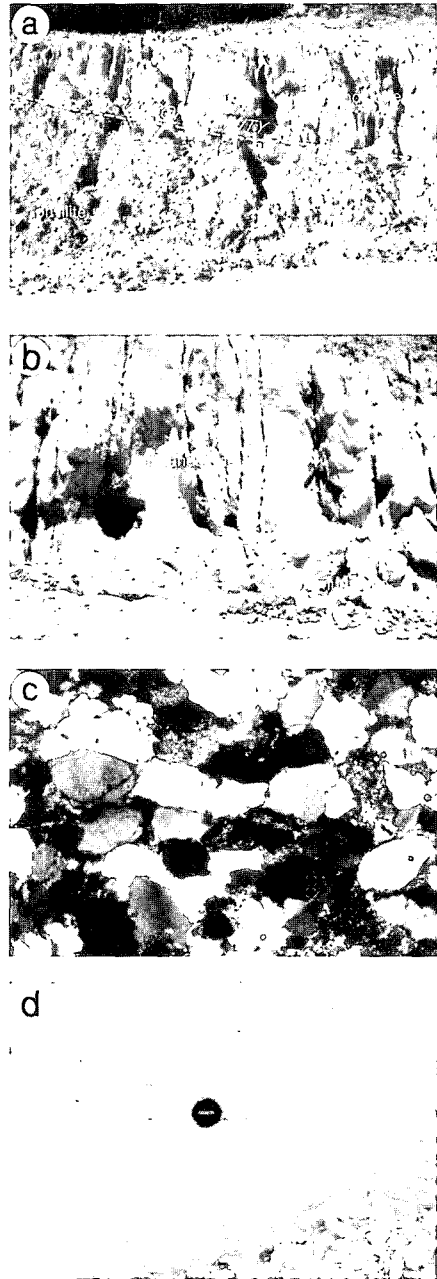


Fig. 9. Outcrop photographs and Photomicrograph of the Tanjung Formation. (a) Unconformity between the Pinoh Metamorphic Rocks (lower part) and the Tanjung Formation (upper part), about 7 km north of Tewah. (b) A thick-bedded sandstone bed. Also observed is a bed of mudstone in the basal part of the photograph, about 7 km north of Tewah. (c) Photomicrograph of sandstone consisting mostly of quartz grains with minor rock fragments. Field of view about 2.2 mm across. (d) Pebble-bearing sandstone. Note matrix-supported fabric, well-rounded vein quartz pebbles and some mudstone intraclasts, near Takaoui.

를 설정할 수 있는 열쇠층이 부족하기 때문에 조사지역의 퇴적암을 기존 층서체계에 따라 층단위로 세분하는데 있어 약간의 어려움이 있었다. 조사지역의 동부 및 동남부에 걸쳐 넓게 분포하는 제3기 퇴적암류는 대부분 탄중층에 속하는 것들로 밝혀져 이보고서에서는 탄중층을 대표적인 층서명으로 기재하였다. 그러나 조사지역의 동남단 연변부 지역은 현장 접근이 불가능하여 지질조사가 완벽하게 수행되지 못하였기 때문에 상기한 나머지 상위 지층들의 퇴적암이 이 지역에 분포하고 있을 가능성을 완전히 배제할 수 없다. 조사지역에 분포하는 제3기 지층들 중 최하위에 놓여있는 탄중층은 주로 사암이 우세한 쇄설성 퇴적암류로 구성되며, 이에 소규모의 석탄층과 석회암이 협재된다. 이 층은 조사지역의 남동부에 넓게 분포하며, 제3기 분지의 북서 경계부에 따라서도 단속적으로 대상분포한다. 따까오이 및 태와 북부 지역에서는 이 지층의 퇴적암류가 고생대 변성암류나 백악기 화강암질암 위에 부정합으로 얇게 피복되어 있는 것이 관찰된다. 기존 자료에 의하면 이 지층에서는 에오세말기를 지시하는 화석이 보고되어 있다(Suetrisno *et al.*, 1994; Margono *et al.*, 1995; Supriatna *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996). 탄중층의 최하부는 태와 북부지역에서 관찰할 수 있다. 이 지역에서는 피노변성암류가 탄중층에 의해서 부정합으로 직접 피복되어 있다(Fig. 9a). 그러나 탄중층과 상위의 말라산화산암류 사이의 층서적 관계를 확실하게 관찰할 수 있는 지역은 매우 드물다. 특히, 조사지역 동부에 위치한 타란 지역에 분포하는 퇴적암은 말라산화산암류의 분포지와 지형적으로 거의 같은 고도 또는 약간 더 높은 고도의 지역에 분포하고 있어 일부는 화산암을 덮는 상위층으로 보인다. 그러나 조사지역 중앙부에 동북동-서남서 방향으로 대상분포하는 피노변성암류는 탄중층에 의해서 피복되어 있으며, 말라산화산암류가 직접 변성암류를 덮고 있는 현상은 관찰되지 않고 있어 탄중층이 화산암류에 비해서 층서적으로 보다 하위의 지층임을 간접적으로 시사해 준다. 탄중층의 퇴적암이 화산암류에 대해 하나 이상의 층수에 걸쳐 분포하고 있는 타란 지역의 야외산상을 고려해보면, 아마도 탄중층의 퇴적말기에 말라산화산암류가 동시에 분출하여 형성되었던 것으로 해석함이 타당할 것으로 생각된다. 탄중층의 대부분은 사암, 함력사암, 이암 등과 같은 쇄설성 퇴적암으로 구성되며, 탄층과 석회암도 국부적으로 관찰된다. 사암은 탄중층을 구성하는 가장 대표적인 암상으로 조사지역의 도처에 나타난다(Fig. 9b). 사암의 두께는 10cm에서부터 5m에

이르기까지 다양하다. 일부 사암층은 일정한 두께를 유지하지만, 다른 것들은 하도충진에 의한 현상으로 추정되는 심한 측면 두께변화를 보여준다. 대부분의 사암은 중립질이지만, 세립질 사암과 조립질 사암도 역시 관찰된다. 사암층 내에서 가장 흔한 퇴적구조로는 수평층리가 있지만 일부 사암은 미약한 층리나 괴상을 보여주기도 한다. 또한, 드물기는 하지만 평행 혹은 곡형 시층리가 관찰되기도 한다. 탄중층의 사암은 암석학적으로 석영질 사암과 암편질 사암의 두 가지 종류로 세분할 수 있다. 석영질 사암은 사암의 약 80%를 구성하고 있으며, 주로 석영입자들로 구성되어 있고 일부 소량의 암편을 포함한다(Fig. 9c). 석영질 사암은 함력사암, 역암, 이암 등과 같이 나타난다. 석영질 사암의 기질은 주로 균운모로 구성되며, 석영과성장 교질물도 역시 관찰된다. 또한, 석영입자들은 유체포유물을 많이 포함하고 있으며, 이는 아마도 이들이 석영맥으로부터 기원하였기 때문으로 생각된다. 암편질 사암은 사암의 약 20%를 구성하고 있으며, 화산암편과 기질의 함량이 높고 입자크기가 세립질인 것을 특징으로 들 수 있다. 탄중층에서는 사암 내에 흔히 함력사암과 역암이 협재되어 나타난다. 함력사암과 역암은 역의 함량과 조직에 의해서 구분된다. 함력사암은 비교적 소량의 역을 함유하고 있어 기질지지조직(matrix-supported fabric)을 보여주지만(Fig. 9d), 역암은 높은 역의 함량으로 인해 암편지지조직(clast-supported fabric)을 보여준다. 함력사암은 대체로 괴상으로 나타나거나 미약한 층리를 보여주는 반면, 역암은 드물게 정상 점이 층리나 혹은 약한 인편구조를 보여준다. 함력사암과 역암내에 들어있는 역의 크기는 대체로 2cm 내지 5cm 정도이지만, 큰 것은 10cm 정도에 달한다. 역의 암상은 다양하게 나타난다. 대부분의 역은 좋은 원마도를 보여주는 유백색의 석영맥 기원의 석영으로 구성되어 있다. 다른 역들은 화강암질암, 화산암, 변성암으로 구성되어 있다. 또한, 국부적으로는 하위의 이암층에서 떨어져 나온 이암 인트라클라스트도 관찰된다. 이들은 각지고 불규칙한 모양을 보여주는 것이 특징인데, 이는 아마도 퇴적당시에 고화정도가 약했기 때문인 것으로 추정된다. 이암은 탄중층의 비교적 적은 부분을 구성하고 있다. 이암은 흔히 사암과 함력사암 사이에 10cm 내지 수 십cm 두께를 가지고 협재되지만, 두께 1m 이상의 비교적 두꺼운 이암층도 관찰된다. 이암의 전형적인 색은 중간 내지 어두운 회색이지만, 지역에 따라서는 자색을 띠기도 한다. 일부 이암, 특히 화산암편이 많은 사암과 같이 나타나는 이암은 다양한 양의

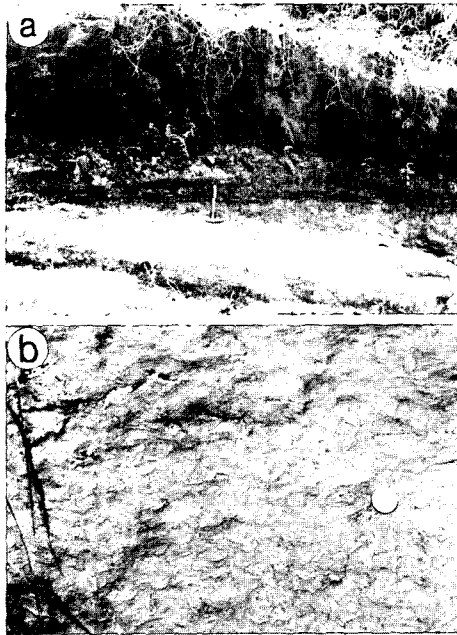
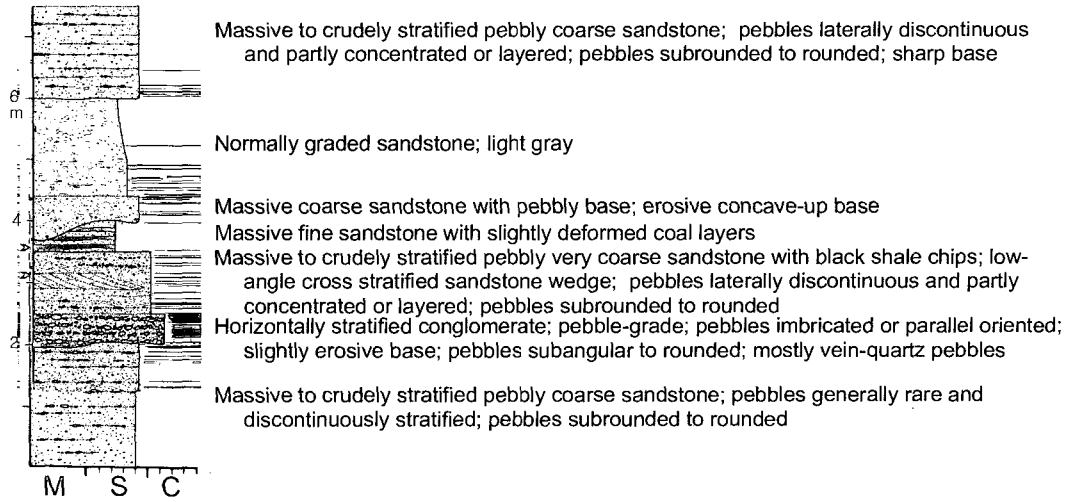


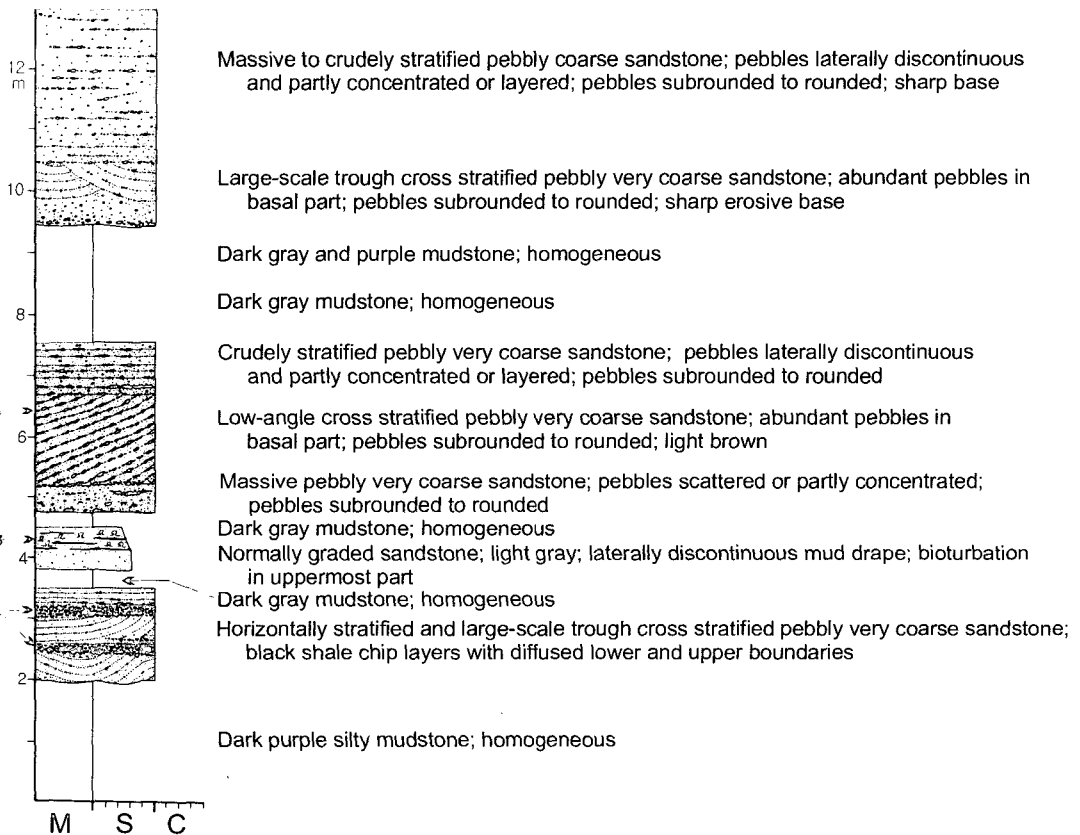
Fig. 10. Outcrop photographs of the Tanjung Formation. (a) Coal seams with intercalated mudstone beds, Taran. (b) Limestone showing numerous bioclasts of foraminifera, mollusca, echinoderm and other fossils, midstream part of the Manyangan River.

결핵체 (concretion)을 수반한다. 결핵체는 렌즈모양으로 나타나며, 성분은 석회질이다. 결핵체의 평균높이는 1.5cm이며, 평균길이는 4cm 정도이다. 많은 결핵체는 파쇄의 증거를 보여주는데, 이는 아마도 성장동안에 발생한 파괴가 원인이었던 것으로 사료된다. 타란 지역 부근에 분포하는 탄중층 내에는 석탄층이 협재되어 나타난다 (Fig. 10a). 석탄층은 전형적인 흑색 또는 암갈색을 띠며, 석탄층 사이에는 다소 세립질의 사암 또는 이암이 수반되어 나타난다. 각 석탄층의 두께는 50cm를 넘지 않으며, 탄화목 파편이 관찰되기도 한다. 안산암 관입체 주변의 석탄층과 교호하는 이질암에서는 열변성작용으로 인해 형성된 미세한 홍주석 결정들이 관찰된다. 쿠알라쿠룬 (Kuala Kurun)과 태화 사이에 카하안강의 지류를 형성하고 있는 만양안강 (Manyangan River)의 중류부에는 다른 지역의 퇴적암과는 다른 특성을 보이는 퇴적암이 분포한다. 이 지역의 퇴적암은 석회암, 사암 및 이암으로 구성되어 있다. 석회암은 특징적으로 담갈색 내지는 담회색을 띤다. 석회암은 유공충, 극피동물, 연체동물 등의 화석을 함유하고 있어 전체적으로 왁스톤 (wackestone)의 조직을 보여준다 (Fig. 10b). 석회암과 같이 나타나는 사암은 세립질

의 입자크기, 잘 발달된 엽층리 (lamination), 좋은 측면 연장성 등이 특징이다. 이암은 사암 혹은 석회암과 교호되어 나타나며, 암회색 내지 녹회색을 띤다. 3차년도 조사에서는 연구지역 내 제3기층의 층서를 정립하고, 탄중층의 퇴적환경을 구체적으로 파악하기 위하여 조사지역에 대한 퇴적학적 연구를 병행하였다. 연구지역 대부분이 필립으로 덮여 있고, 노두는 목재를 운반하기 위하여 개설된 도로의 일부 지역에만 국한되어 분포하기 때문에 체계적인 퇴적학적 연구를 수행하기에는 어려움이 많았으나, 퇴적상, 퇴적구조, 퇴적체의 지형 및 형태구성요소 (architectural element) 등의 퇴적학적 요소를 관찰할 수 있는 일부 지역의 노두를 선정, 탄중층의 퇴적환경을 파악하고자 하였다. 탄중층은 주로 (역질)사암과 이암의 교호로 구성되며, 역암은 사암층 내에 수십 cm 두께로 얇게 협재하는 양상을 보인다 (Fig. 11, 12, 13, 14). 역암은 20-50cm 두께를 갖는 역지지 (clast-supported)된 괴상 내지는 수평층리를 보이는 잔자갈 역암으로서 하위의 이암이나 사암을 얇게 깔고 매우면서 침식된 하부 경계면을 형성하는 하도층진 퇴적체의 역암 단위층으로 분포한다. 역은 주로 아원형-원형의 맥석영으로 구성되며, 이러한 양상은 탄중층 내 모든 역암에서 동일하게 관찰된다. 사암은 흔히 상향 세립화 경향을 보이는 역질 내지 극조립-세립의 사암으로서, 사암체는 최대 5m 정도의 두께를 가지며, 수십cm-수m의 두께를 갖는 괴상, 성근층리, 수평층리, 곡사층리의 공동작 (coset), 평행사층리 및 점이층리 등을 보이는 사암 단위층으로 구성되어 있다 (Fig. 11, 12, 13, 14). 역암층 상위에 놓이는 일부 사암층은 점이적인 하부 경계면을 보이기도 하나, 대부분의 사암 단위층들은 하위의 사암층이나 이암층을 얇거나 깊게 깔고 매우는 침식된 하부 경계면을 형성하며 (Fig. 15a), 판상 혹은 하도형의 외부형태를 갖는다. 수평적 연장성이 매우 양호한 사암체에서는 로브상 (Fig. 15b, arrow 1) 혹은 하도형 (Fig. 15b, arrow 2)의 지형을 보이기도 하며, 이들은 상향조립화 경향을 보인다. 특히 역질사암층 내에는 층리면에 평행하거나 경사지게 배열된 뜰어림역편 (rip-up clast)이 포함되기도 하며 (Fig. 11b, arrow 1; Fig. 13, arrow 1), 일부 세립 사암층에서는 수평적 연장성이 불량한 탄층 (Fig. 11a, arrow 2) 또는 생교란 (bioturbation) 흔적화석이 관찰되기도 한다 (Fig. 11a, arrow 3). 이암은 암회색, 회색, 녹회색 및 적자색을 띠는 수cm-2.5m의 두께를 갖는 괴상 이암이며, 특히 적자색 이암에서는 생교란 흔적화석 및 칼리쉬 단괴도 관찰된다 (Fig. 13, arrow

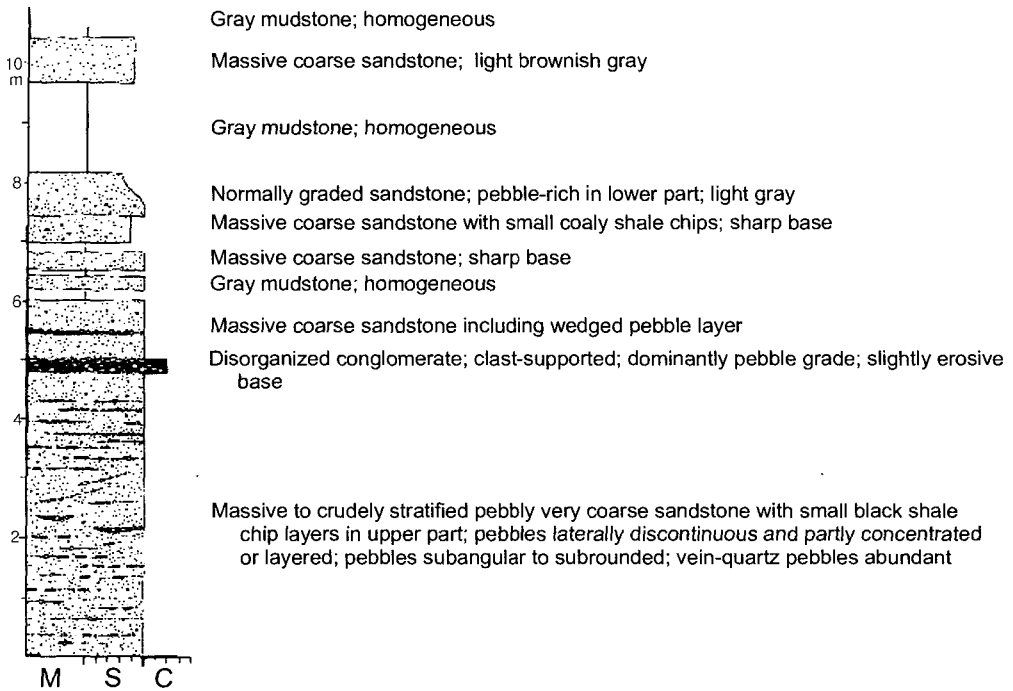


(a)

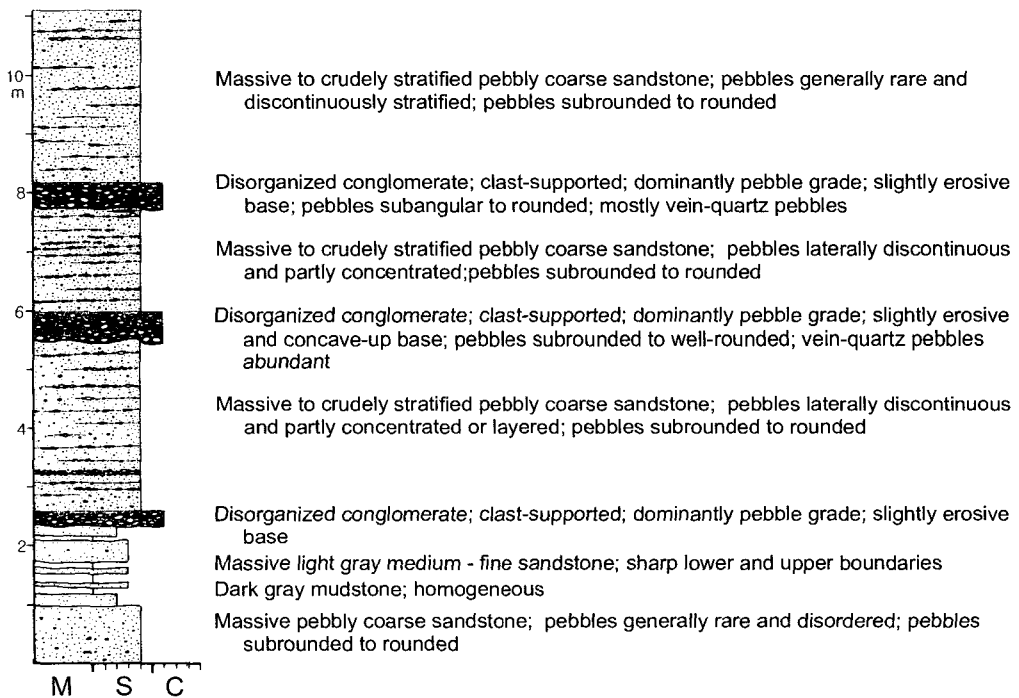


(b)

Fig. 11. Columnar sections and detailed descriptions of (a) KR-1 and (b) KR-2 sections (M: mudstone, S: sandstone, C: conglomerate). For locations, see the 1 : 100,000-scale geologic map of the project area.



(a)



(b)

Fig. 12. Columnar sections and detailed descriptions of (a) KR-3 and (b) KR-4 sections (M: mudstone, S: sandstone, C: conglomerate). For locations, see the 1 : 100,000-scale geologic map of the project area.

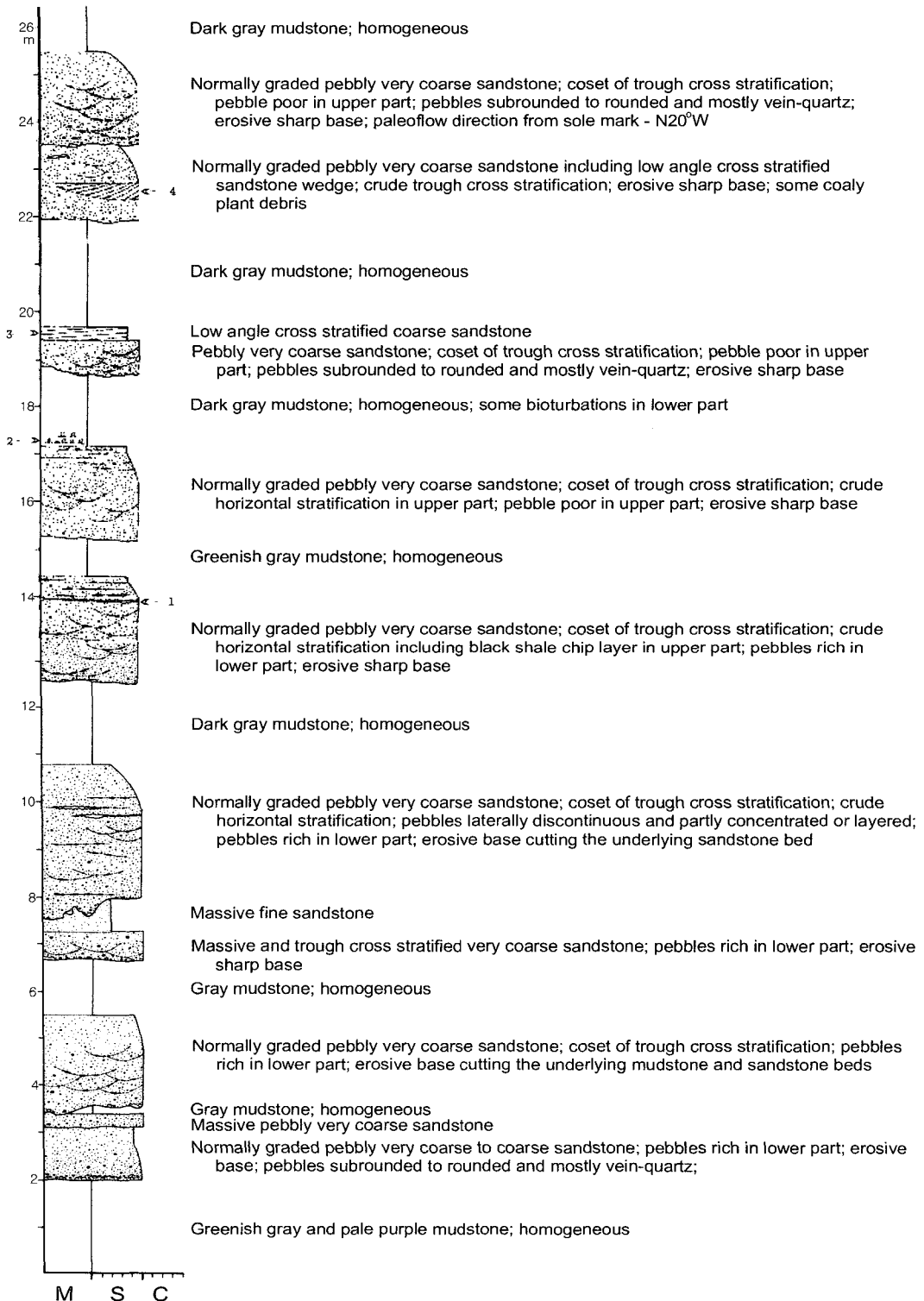


Fig. 13. Columnar section and detailed description of (a) KR-5 section (M: mudstone, S: sandstone, C: conglomerate). For locations, see the 1:100,000-scale geologic map of the project area.

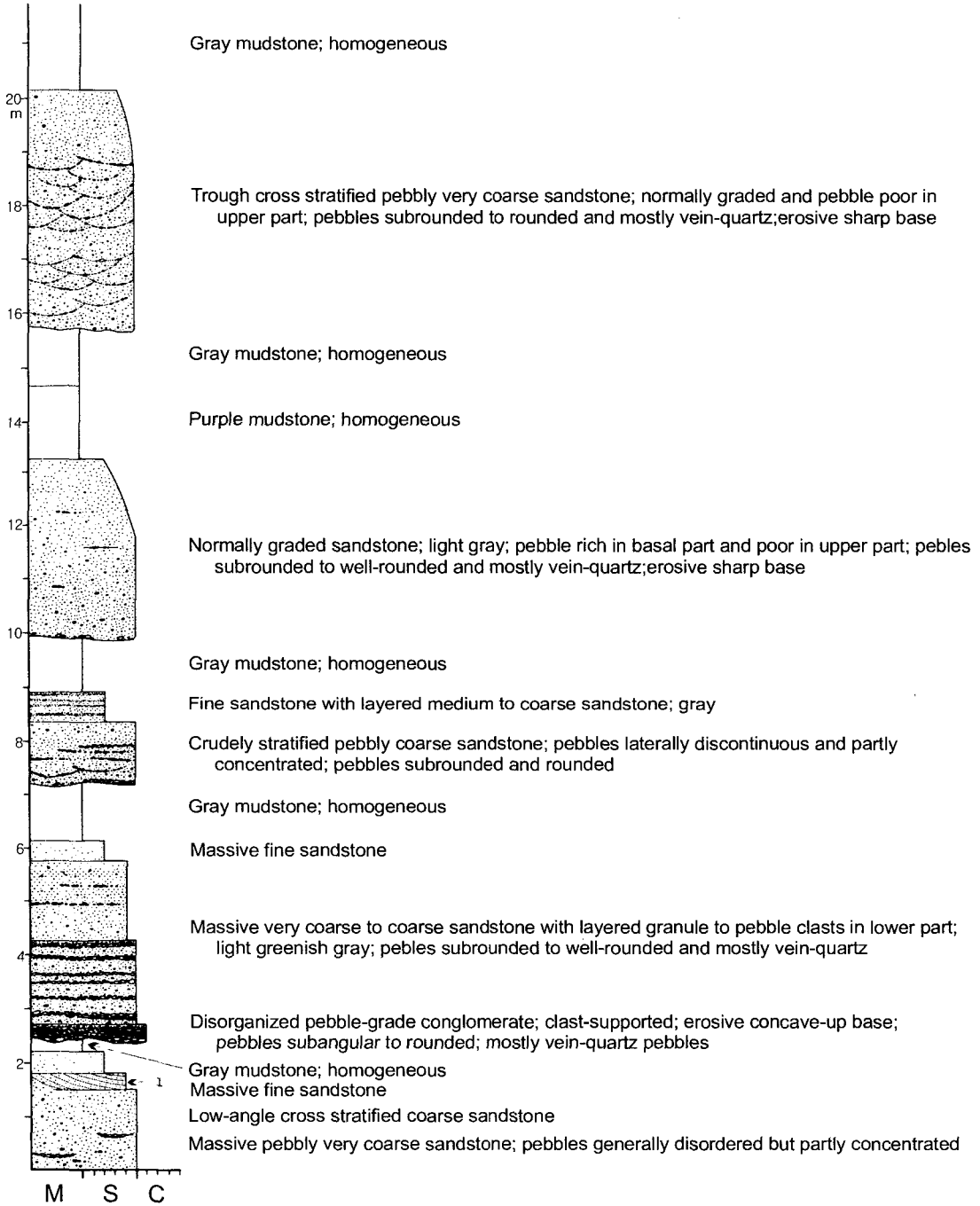


Fig. 14. Columnar section and detailed description of (a) KR-6 section (M: mudstone, S: sandstone, C: conglomerate). For locations, see the 1:100,000-scale geologic map of the project area.

2). 탄층층의 주된 구성 암석인 역암이나(역질)사암층이 흔히 하위의 이암층을 침식하는 뚜렷한 하부 경계면을 형성하며, 상향 세립화 경향, 수평층리, 꼭사층리 및 평

행사층리 등의 퇴적구성요소를 포함하는 점은 이들이 하도 충진 퇴적물임을 지시한다. 역질사암 단위층에서 점이층리를 흔히 형성하며, 잔자갈 역의 횡적분포에 의

한 성근층리 및 수평층리가 우세한 현상은 (Fig. 12) 이들이 고농도수류(hyperconcentrated flood flow)에 의해 형성된 것임을 지시한다. 고농도수류는 퇴적물이 홍수에 의해 급격히 이동되며 형성되는 것으로 유수 내의 퇴적물의 함량이 쇄설류(debris flow)와 하천유수의 중간정도인 것으로 알려져 있다(Smith, 1986). 또한 잔자갈 역을 흔히 포함하며, 곡형사층리가 잘 발달되는 (역질)사암 단위층은 (Fig. 13, 14) 상부유권(upper flow regime)의 견인퇴적(traction sedimentation)이 활발하며, 시주의 이동이 빈번하게 일어나는 굴곡하도에서 퇴적되었음을 지시한다. 특히 두께가 1.5 m에 이르는 사암 단위층이 고각도로 하위 침식면과 만나는 역질사암층은 (Fig. 11b, arrow 4) 수류방향에 직각인 사주에서 하류누적(downstream accretion; DA element of Miall (1985))에 의해서 퇴적된 것이며, 반면에 역질사암층 내에 켜기상으로 협재되면서 저각도 평행사층리를 보이는 사암은 (Fig. 11a, arrow 5; Fig. 13, arrows 3과 4; Fig. 14, arrow 1) 굴곡하도에서 측면누적(lateral accretion; LA element of Miall (1985))에 의해 퇴적된 것으로 해석된다. 수평적 연장성이 양호한 노두에서 관찰되는 로브상 혹은 하도형의 지형과 상향 조립화 경향은 이들이 해양과 접하는 삼각주 전면(delta front)에 발달된 하도나 퇴적로브의 말단부분에서 퇴적된 것이다. 반면에 수평적 연장성이 불량하고, 하부 경계면이 침식되었으며, 상향 세립화 경향 및 측면누적을 흔히 포함하는 사암체는 좀더 근원지에 가까운 삼각주 평원(delta plain)에 분포하는 하천에서 퇴적된 것으로 추정된다. 적자색 이암에서 흔히 발견되는 칼리쉬 단괴와 생교란 흔적화석 등은 이 퇴적층이 건조한 기후의 범람원 환경에서 퇴적된 것임을 지시한다. 탄중층은 퇴적상, 퇴적구조, 퇴적체의 지형 및 형태구성요소에 의해 크게 2개의 하도층진 상호작용으로 구분된다. 첫 번째 상호작용은 조사지역 내 탄중층 분포지 북쪽 지역에서 관찰되는 상호작용으로서 (Fig. 12), 이들은 범람원 기원의 비교적 얇은 이암층 내에 최대 9m의 두께를 갖는 하도형의 두꺼운 역암과 (역질)사암의 연계층(sequence)으로 구성되는 상호작용이다. 두 번째 상호작용은 상대적으로 남쪽 지역 사암체에서 인지되는 상호작용으로서 (Fig. 11, 13, 14) 이들은 0.5-2.5 m 두께의 범람원 기원의 두꺼운 이암층 내에 1-4 m 두께의 북쪽보다 얇은 두께를 갖는 하도형 역암과 (역질)사암의 연계층으로 구성되는 상호작용이다. 첫 번째 상호작용은 두꺼운 역암 및 역질사암의 연계층과 상대적으로 얇은 두께를 갖는 이암층이 교호하는 점, 사

암체 내부에 측면누적층이 없고 수평층리가 잘 발달되는 점, 또한 (역질)사암층의 하위 침식면이 흔히 층리면에 평행하게 발달되는 점 등이 특징이며, 이들은 주로 홍수기에만 유수가 흐르는 저굴곡 하도계에서 퇴적되었음을 시사한다. 반면에 두 번째 상호작용은 암회색, 회색 및 녹회색의 이암이 우세하게 분포하며, 탄중이 흔히 협재되며, 사암체 내부에 측면누적층이나 침식면 등이 잘 발달되는 점 등이 특징이다. 이들은 고굴곡 하도계에서 퇴적된 것으로 해석되며 아울러 하도계와 인접한 범람원 내에서는 저습지 환경이 지속적으로 유지되었음을 지시한다. 탄중층 북쪽으로부터 남쪽으로 가면서 관찰되는 이러한 상호작용의 변화는 탄중층을 구성하는 퇴적물이 전체적으로 북쪽으로부터 남쪽으로 가면서 세립화하며, 동시에 삼각주 평원 내의 하도 규모가 남쪽으로 가면서 저굴곡 하도계로부터 고굴곡 하도계로 변하는 하계망을 형성했었다는 것을 지시한다. 이러한 사실과 기 조사에서 밝혀진 조사지역 내 탄중층 분포지 남쪽 만양안강 유역에서 해성기원의 화석들을 포함하는 석회암이 분포하고 있는 사실을 종합할 때, 탄중층은 전체적으로 북쪽으로부터 남쪽으로 발달하는 고수류계(paleoflow system)를 유지하는 삼각주 환경(delta plain and delta front environment)에서 퇴적되었으며, 이들은 만양안강 유역의 석회암 분포지에 이르러서는 천해 해저환경(shallow marine environment)으로 전이된 것으로 해석된다.

2.3.2. 말라산화산암류

조사지역 내의 말라산화산암류는 주로 중성의 화산암류로 구성되며, 조사지역의 중앙부를 중심으로 넓게 분포하고, 타란 지역에도 일부 분포한다. 이 화산암류는 기존에 시안안산암층(Sian Andesite Formation; Ministry of Mines and Energy *et al.*, 1979) 또는 시안화산암류(Sian Volcanics; Bugg *et al.*, 1998)라고 불리워졌던 것과 동일지층이다. 이 지층의 지질시대는 올리고세로 알려져 있다(Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996). 신선한 노두의 발달이 매우 제한적이기 때문에 많은 시료에 대해 화학분석을 실시하지 못하였으나, 일부 화학분석 결과(시료번호 H35)와 현미경관찰에 의하면 화산암류는 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열의 안산암 내지 석영안산암에 속하는 것으로 나타났다. 이 화산암류 중에는 안산암질 화산쇄설암이 가장 우세하게 분포하는데, 결정질응회암, 라피리응회암, 응회각력암 및 집괴암과 같은 응회질암석이 포함되며 (Fig. 16a), 이에 안산암질 내지 현무암질 용암을

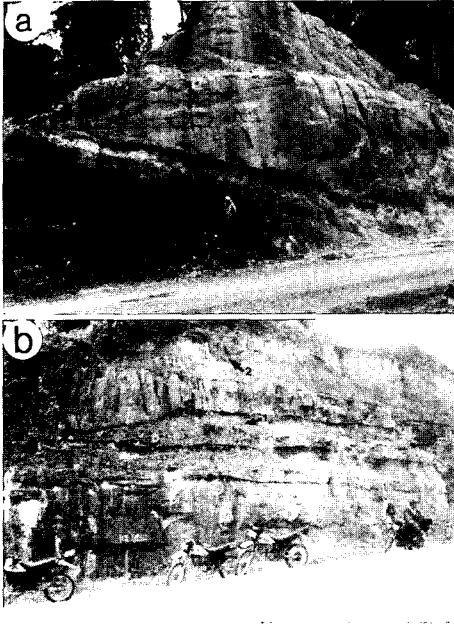


Fig. 15. Outcrop photographs of the Tanjung Formation. (a) Well-defined scoured bases of the overlying sandstone of KR-5 section, about 9 km northeast of Tewah. (b) Distinct lobate (arrow 1) and channelized (arrow 2) sandstones of KR-7 section, about 2 km northeast of Kuala Kurun.

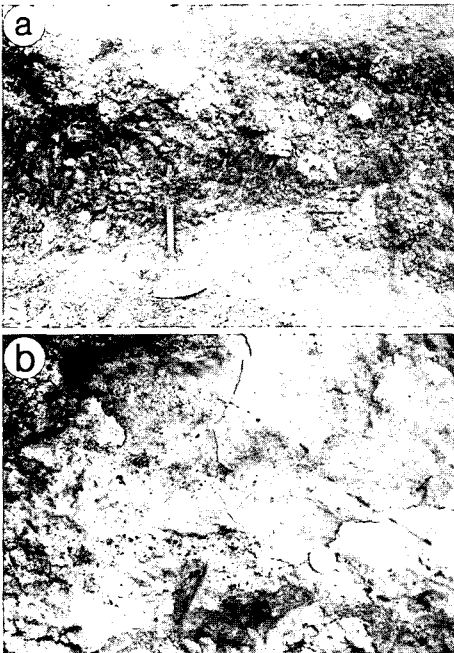


Fig. 16. Outcrop photographs of the Malasan Volcanics. (a) Crudely stratified lapilli tuff and tuff-breccia, about 2km south of Tb. Lapan. (b) Tuffaceous sandstone intercalated with volcanics, about 5 km north of Tb. Miri.

수반한다. 이들 화산쇄설암류들은 서로 혼재되어 나타나며, 노출이 불량하고 풍화작용이 매우 심하여 이들 간의 경계를 정확하게 구획하기가 매우 어렵다. 화산암류 분포지에는 많은 지역에서 광화대가 형성되어 있으며, 특히 타란 지역에서는 금을 함유한 석영맥의 모암을 이루고 있다. 그리고 이 화산암류 내에는 쇄설성 퇴적암류가 협재되는데 (Fig. 16b), 뚝방미리 및 뚝방함 푸통 주변 지역에 국부적으로 분포하는 것이 관찰된다. 화산쇄설암 중에는 안산암질의 결정질응회암이 가장 넓은 분포를 보인다. 결정질응회암의 경우 대부분 1mm 내외의 사장석 반정이 비교적 고르게 함유되어 있으며, 이차적인 변질작용에 의해서 형성된 녹염석이나 방해석도 관찰된다 (Fig. 17a). 이에 수반되는 라피리응회암과 같은 석질응회암은 화산암편을 주로 포함하며, 약간의 사장석 결정을 수반한다 (Fig. 17b). 화산암류 내에 수반되는 퇴적암류는 사암과 역질사암이 주를 이루고 렌즈상의 이암이 박층으로 협재되며, 수cm 두께의 탄층도 함께 관찰된다. 탄층층의 퇴적암류에 비해 퇴적물의 전체함량 중 화산암질 성분이 많으며, 역질암의 역들도 대부분 화산암류에서 공급된 것들로 구성되어 있는 것이 특징이다. 아마도 이들은 화산활동과 같은 시기에 육성의 얇은 수저환경에서 형성되었던 퇴적층으로 생각된다.



Fig. 17. Photomicrographs of the Malasan Volcanics. (a) Lithic tuff. (b) Crystal tuff (lf: lithic fragment, pl: plagioclase, ep: epidote, cal: calcite). Field of view about 2.2 mm across.

2.3.3. 신탕관입암류

이 관입암류들은 상기한 제3기 지층들을 관입하고 있는 플러그나 맥암 형태로 산출되며 특히 타란 지역에 집중적으로 분포한다. 플러그상으로 관입된 암체들은 지형적으로 타 지층의 분포지에 비해 보다 높은 고도의 도움형 또는 사면이 급한 원추형의 지형을 보이고 있어 타 지층들이 이루는 평탄한 지형과는 뚜렷히 구별된다. 흔히 주변의 화산암류나 퇴적암류에 비해 풍화작용에 상대적으로 강하여 노두의 발달이 보다 현저하며, 암체내에 수직의 주상절리가 발달되어 있는 것이 일부 관찰된다(Fig. 18a). 이 암체의 관입을 받은 말라산화산암류 내에는 그 관입 경계부의 연변을 따라 변질작용이 발생하여 광화대가 형성되어 있는 것이 흔히 관찰된다. 이 암체는 대부분 중성 내지 염기성 관입암으로 구성되어 있으며, 화학분석 결과에 의하면 화산암류는 모두 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열의 현무암, 현무암질 안산암, 현무암질 조면안산암, 안산암 등의 다양한 성분을 갖는 것으로 나타났다. 기존에 이 관입암체들의 지질시대는 마이오세 초기로 보고되어 있으나 (Margono *et al.*, 1995; Sumartadipra and Margono, 1996), 연대측정 결과 올리고세에 형성된 관입체가 주

를 이루고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이 관입암류의 지질시대는 올리고세 내지 마이오세초로 보는 것이 타당하다고 생각된다. 대부분의 중성관입암류의 경우 유리질 또는 트라키질 조직을 갖는 극세립의 기질내에 자형의 사장석 반정들이 함유된 반상구조가 매우 잘 나타난다. 사장석 반정의 크기는 0.5-3 mm로서 평균 1mm 이하이며, 반정과 기질의 함량비는 다양하게 관찰된다. 반정광물로는 누대구조의 발달이 우세한 사장석이 주를 이루며, 현무암질 암석의 경우 clinopyroxene 및 orthopyroxene이 흔히 관찰된다(Fig. 18b). 각암석 반정은 휘석류에 비해 잘 관찰되지 않으나, 일부 사문석으로 치환된 pseudomorph로 산출한다. 기질은 대부분이 세립의 사장석으로 구성되며, 입상광물로 휘석 및 일부 감람석이 관찰된다.

2.4. 제4기 충적층

충적층은 하상 또는 범람원 환경에서 퇴적된 자갈, 모래, 미사, 점토 등의 미고결 내지 반고결 퇴적물로 구성되며, 주요 강이나 하천을 따라 집중적으로 분포한다. 그리고 주요 강의 연안을 따라 발달된 충적평야에는 보다 오래된 퇴적층이 분포하는데, 현 하상보다 약 1-2m 정도 높은 위치에 퇴적되어 있다. 이들 퇴적층은 모두 사금을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다.

3. 지질구조

조사지역은 고생대 후기의 변성퇴적암류가 퇴적된 이후부터 발생한 4회의 변형작용이 인지된다. 지질구조 분석에 의하면 먼저 일어난 3회의 변형작용은 신생대 제3기 이전에 발생했던 것으로 나타난다. 변형작용의 순서와 관련구조의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1). D1 변형작용: 광역변성작용, 변성암류의 습곡작용 및 S1 편리구조 형성; 2). D2 변형작용: 백악기 화강암질암의 연성전단작용; 3). D3 변형작용: 습곡작용 및 S2 파랑백개 형성; 4). D4 변형작용: 남-북 방향의 압축 응력하에서의 단층작용 조사지역에서 관찰되는 주요 지질구조 요소로는 변성암류와 화강암질암의 엽리구조, 퇴적암의 층리, 그리고 단층 등이 있다. Fig. 19는 이들 구조요소의 방향성을 살펴보기 위해 구조요소와 지역별로 등면적 입체투영도에 도시한 것이다. 각 변형작용들의 구조적 특징은 다음과 같다.

3.1. D1 변형작용

D1 변형작용은 피노변성암류에 국한되며, 습곡작용

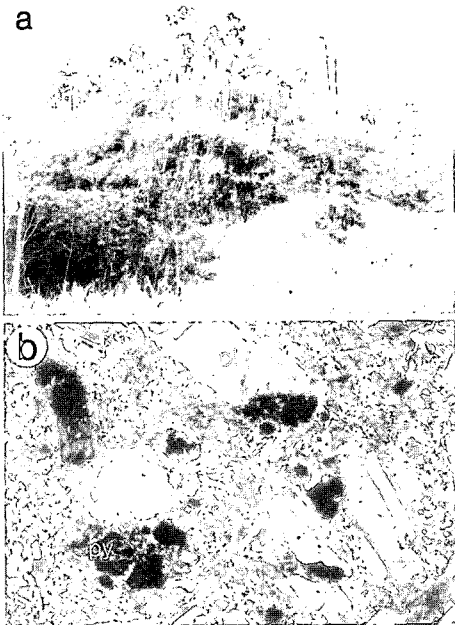


Fig. 18. Outcrop photograph and photomicrographs of the Sintang Intrusives. (a) Andesite plug showing the vertical columnar joints, Taran. (b) Basaltic andesite containing plagioclase and pyroxene phenocrysts within the matrix with trachytic texture (pl: plagioclase, py: pyroxene). Field of view about 2.2 mm across.

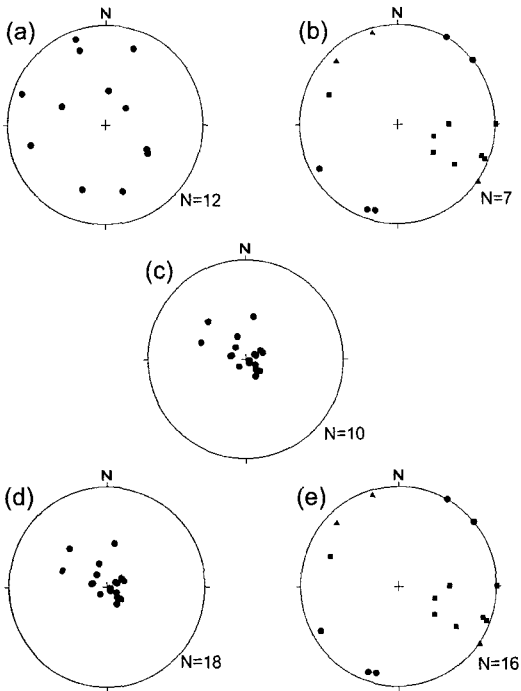


Fig. 19. Equal-area, lower hemisphere stereographic projections of structural elements (N: number of data). (a) Foliation of metamorphic rocks, west and northwestern part. (b) Foliation of metamorphic rocks, middle part. (c) Foliation of foliated granitoids. (d) Bedding plane of sedimentary rocks, (e) Minor faults (closed triangles: sinistral strike-slip fault, closed circles: dextral strike-slip fault, closed rectangular: normal fault).

과 관통상으로 발달하는 S1광역엽리구조로 특징지어진다(Fig. 20). 이 시기의 습곡은 노두 규모의 등사형 횡외습곡으로 관찰되는데, 운동학적 해석에 근거한 이 습곡작용의 성인을 밝히기에는 이 습곡 노두의 발달이 매우 드물기 때문에 곤란하였다. S1 엽리는 편리나 벽개로 관찰되며, 운모류나 편평하게 변형된 광물입자의 면적 정향배열에 의해서 이루어진다. D1 변형작용과 관련한 변성작용에 대해서는 자세한 연구를 수행하지 못하였다. 보통 S1 엽리는 흑운모+석영+백운모로 구성되며, 부분적으로 석류석을 포함하는 광물조합을 보이기도 한다. 일부 천매암에서는 운모를 교대하고 있는 규선석이 관찰되기도 하나 이는 인접한 화강암질암의 관입과 관련된 열변성작용의 영향으로 해석할 수 있다. 조사지역의 서부 및 북서부에 분포하는 변성암에서의 S1 엽리는 북동에서 동북동 방향의 주향과 북서 또는 남동 방향으로 완만하거나 급한 경사를 이루면서 분포하고 있다(Fig. 19a). 그리고 조사지역의 중

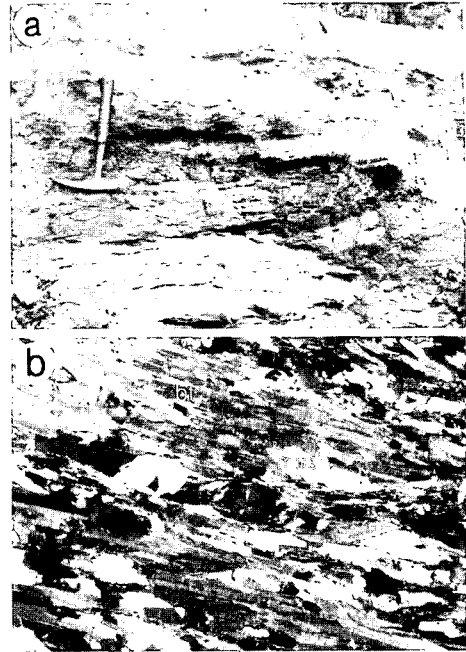


Fig. 20. (a) Outcrop photograph of F1-fold in phyllite. The fold is isoclinal and recumbent type, about 10km northeast of Tewah. (b) Photomicrograph showing S1-foliation in mica schist (bt: biotite, qtz: quartz, mus: muscovite). Field of view about 2.2 mm across.

양의 남동부에 분포하는 변성암류의 S1 엽리 역시 북동 내지 동북동 방향의 주향과 북서 방향의 경사를 갖고 분포하는 것이 우세하다(Fig. 19b).

3.2. D2 변형작용

D2 변형작용은 중립질 화강암질암내에 엽리조직을 형성시킨 연성전단작용으로 특징지어진다. 수집된 자료의 수가 충분치 않아 변형대의 전반적인 방향 및 공간적인 분포양상을 규명하기에는 어려움이 있다. 그러나 엽리의 방향성 변화나 화강암질암내에 비변형대가 반복적으로 분포하는 현상으로 미루어 보아 여러 갈래의 변형대가 분기되거나 다시 합쳐지는 형상으로 발달하고 있을 가능성이 매우 크다. 엽리의 주향은 주로 북동 내지 동서 방향이며, 그 경사는 북서 또는 남동쪽으로 완만하거나 급한 각을 이루고 있다(Fig. 19c). 엽리면 상에서 신장된 석영입자나 운모류의 선상배열로 나타나는 신장선구조는 대부분 고각의 레이크(rake)를 이루고 있어 전단작용 동안 경사이동성분이 우세 하였음을 알 수 있다. 그러나 결정적인 전단구조의 발달이 미약하여 전단운동의 감각은 알 수 없었다. 일반적으로 변형조직은 약하거나 중간정도의 강도를 갖고 발달

되어 있으며, 변형강도는 점진적으로 변화하는 경향을 보인다. 뚝방미리 부근의 강 연안에서 비교적 강한 전단조적을 관찰 할 수 있다. 엽리상 화강암질암내에 함유된 흑운모나 각섬석이 대부분 이차적으로 녹니석으로 교대되어 있는 것으로 보아 이들 화강암질암은 형성 이후 또는 전단작용 과정 중에 저변성작용을 받았음을 지시한다.

3.3. D3 변형작용

D3 변형작용은 북동 방향 또는 동서 방향의 축을 갖는 습곡작용으로 대표되며, 이는 변성암류 엽리면들의 방향성 변화로 인해 그 극점들이 약한 대원을 이루고 있는 현상으로부터 예측할 수 있다(Fig. 19의 a와 b). S2 엽리는 S1 엽리를 변형시킨 파랑벽개로 나타나며, 편암이나 천매암 내에 D3 시기에 형성된 소규모 습곡의 측면 엽리로서 습곡의 축부에 제한적으로 발달한다(Fig. 21). S2 파랑벽개 엽리는 discrete 또는 zonal cleavage 형태로 나타나며, discrete cleavage 경우에는 상대적으로 잘 용해되지 않는 광물 잔류물들이 집중한 스타일로라이트질 벽개로 형성되어 있다. 이 같은 S2 엽리의 미구조적 특징은 S2 벽개의 발달이 S1 엽리의 미습곡작용이나 압력용해작용(pressure

solution)에 의해서 형성되었음을 지시한다.

3.4. D4 변형작용

조사지역의 구조적 방향성은 광역적으로 북동 방향이 매우 우세하다. 이 방향은 제3기 동안에 발생한 D4 변형작용의 결과로서, 남-북 방향의 압축응력하에서 단층작용이 발생한 것으로 해석된다. 조사지역의 주 단층들은 대규모의 선형구조(lineament)를 이루고 있으며, 북동 내지 동북동 방향의 단층대가 매우 우세하다. 그러나 이 대단층들은 노두의 발달이 불량하여 그 특성을 밝히기가 용이하지 않다. 야외에서 단층의 실제 궤적은 노출되어 있지 않으나, 대부분의 주 단층들은 수직이거나 매우 급한 경사를 이루고 있는 것으로 예상된다. 이들 주 단층과 이에 수반되어 분기된 단층들의 운동방향은 야외에서 직접 확인할 수 없으나, 지층의 분포양상으로 미루어보아 주단층들은 주로 좌수향의 주향이동 운동을 겪은 것으로 추정되며, 이에 신장성의 수직운동이 동반되었던 것으로 해석된다. 이런 형태의 단층으로는 1970년대 중후반에 MMAJ와 JICA에 의해서 명명되었던 Rangan Hiran- Siruk-Tajungan Tectonic Line이 대표적이다. 조사지역의 서부를 북동-남서 방향으로 가로지르는 이 구조선은 서로 평행하게 집중되어 발달하는 수 조의 단층들로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다(Bugg et al., 1998). 태화 지역의 북부에서 관찰되는 탄층층과 말라산화산암류와의 경계 역시 단층대로 확인된다. 조사지역의 중부-동남부에 동북동 방향으로 협장하게 대상분포하는 피노변성암류 역시 동일 방향의 구조선을 따라 구조적으로 상승된 지괴의 축부를 형성하고 있는 것으로 해석되며, 그 경계나 그 연변을 따라 형성된 단층들은 제3기 퇴적암이나 화산암류의 초기의 퇴적작용과 분포양상에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 북서 방향의 단층은 타란 지역에서 관찰되며, 북동 방향 단층과 함께 공액상으로 발달한다. 따라서 이 단층은 우수향의 주향이동 운동을 우세하게 겪었던 단층으로 해석되나, 일부는 정단층으로 해석된다. 제3기 지층들에 발달되어 있는 지질구조 상대적으로 매우 단순하다. 층리는 전반적으로 거의 수평을 이루고 있으며, 약간의 곡굴현상을 보일 뿐 그 경사각은 대부분 20°를 넘지 않는다. 이는 주로 단층작용에 수반된 경동(tilting)의 결과로 해석된다(Fig. 19d). 제3기 지층에서 관찰되는 소규모 단층들은 변위양상에 따라 주향이동단층과 정단층으로 나눌 수 있다. 주향이동단층들은 대부분 거의 수직에 가까운 고각의 경사를 이루고 있는데 반하여, 정단층들은 보다

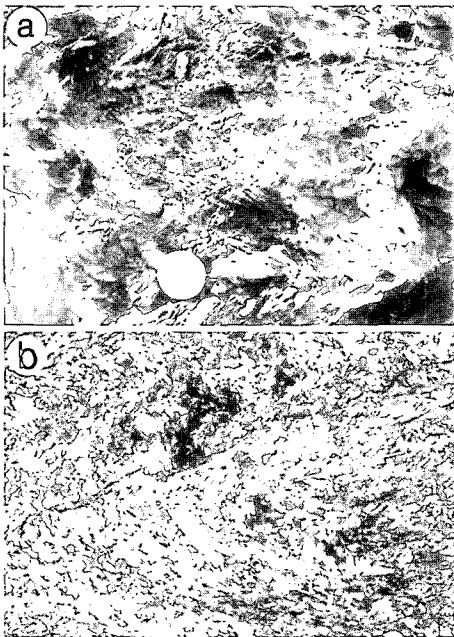


Fig. 21. (a) Outcrop photograph of recumbent F2-fold in dark gray phyllite, about 6km north of Tewah. (b) S2-crenulation cleavage in phyllite. Field of view about 2.2mm across.

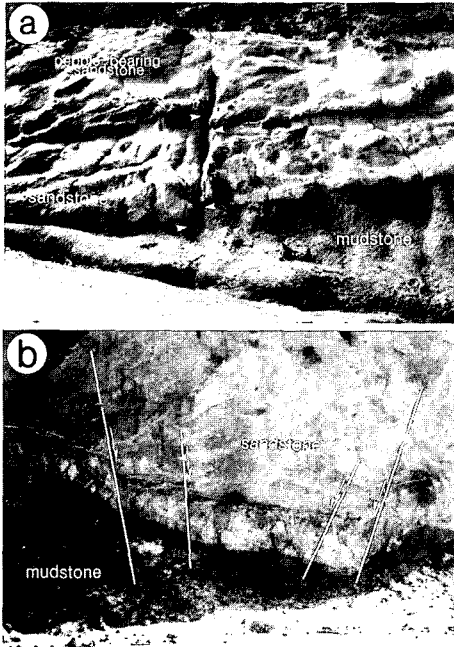


Fig. 22. Outcrop photographs of minor faults. (a) Minor strike-slip fault cutting the sedimentary rocks of the Tanjung Formation, about 10km northeast of Tewah. Note the change in bed thickness across the fault, indicating a strike-slip movement. (b) Normal faults forming a small-scale graben structure, about 6 km north of Tewah.

낮은 경사각을 보인다. 정단층들은 수직단면상에서 공액상으로 발달하며, 소규모의 지구형구조(graben structure)를 형성하고 있는 곳도 관찰된다(Fig. 22). 이들 소규모 단층들의 방향성 분포를 살펴보면, 좌수향의 단층은 북동 방향, 우수향의 단층들은 북서 방향, 그리고 정단층들은 남-북 내지 북북동 방향으로 각각 우세하게 발달하고 있음을 알 수 있다(Fig. 19e). 단층의 특성에 따른 이러한 방향성 분포는 앞에서 언급한 남-북 방향의 압축응력 체계와 일치하는 것이다.

4. 토의 및 결론

조사지역은 지체구조적으로 석탄-폐름기 순다순상지의 동남 연변부에 해당하고, Central Kalimantan Arc 내에 자리한다. 지질은 편암 및 천매암과 같은 변성퇴적암류로 이루어진 석탄-폐름기의 피노변성암류를 최하위 지층으로하여 토날라이트, 화강섬록암, 화강암 등의 각종 화강암질암과 소량의 각섬암 및 섬록암으로 구성된 백악기 세파옥섬성암류가 제3기 분지의 기반암을 형성하면서 분포한다. 제3기 분지는 에오세말기의

탄중층과 올리고세의 말라산화산암류로 충전되어 있으며, 올리고세-마이오세초기의 신탕관입암류가 상기한 모든 지층들을 관입하고 있다. 탄중층은 주로 사암이 우세한 쇄설성 퇴적암류로 구성되며 이에 석탄층과 석회암이 협재된다. 이들은 전체적으로 북쪽으로부터 남쪽으로 발달하는 고수류계를 유지하는 삼각주 환경(delta plain and delta front environments)과 천해해저 환경(shallow marine environment)에서 퇴적되었다. 말라산화산암류는 칼크-알칼리 계열의 중성 화산 쇄설암류 및 용암류로 구성되며, 쇄설성 퇴적암을 일부 협재한다. 신탕관입암류는 상기 지층들을 관입한 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열의 현무암, 현무암질 안산암, 현무암질 조면안산암, 안산암 등의 플라그 또는 암맥상으로 산출된다. 미고결 쇄설성퇴적물로 구성된 제4기 층적층은 현 하상이나 하안 따라 주로 분포한다. 조사지역은 고생대 후기의 변성퇴적암류가 퇴적된 이후부터 발생한 4회의 변형작용이 인지된다. D1 변형작용은 광역변성작용을 수반한 변성암류의 습곡작용 및 S1 편리구조 형성으로 특징지어진다. D2 변형작용은 백악기 화강암질암 내에 발생한 연성진단작용이며, D3 변형작용은 북동 내지 동북동 방향의 축을 갖는 습곡작용 및 이에 수반된 S2 파랑벽개의 형성으로 정의된다. D4 변형작용은 제3기 동안 남-북 방향의 압축응력 하에서 발생한 단층작용으로서, 북동 방향의 좌수향 주향이동단층, 북서 방향의 우수향 주향이동단층, 남-북 내지 북북동 방향의 정단층 등이 형성되었다. 이 단층작용은 제3기 지층의 퇴적과 분포에 영향을 끼친 것으로 해석된다.

사 사

이번 연구는 당 연구원이 인도네시아 중부 칼리만탄 지역에 대하여 1998년부터 2000년까지 한국국제협력단 개발조사사업 연구과제인 “인도네시아 중부 칼리만탄 지질도작성” 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과의 일부이며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Bugg, S., Rafferty, W. and Kerr, J. (1998) Report on SIPP Activities for Period March 1996-July 1997: Final Report Kuala Kurun Project, South Block (DU 1671). Unpublished Report to Barrick Gold Corp., 25p.
 JICA (1979) the report on geological survey of central Kalimantan.
 Margono, U., Sujitno, T. and Santosa, T. (1995) Geological

- map of the Tumbangharam Quadrangle, Kalimantan (1 : 250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).
- Miall, A. D. (1985) Architectural element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. In: Flores, R. M. *et al.*, Eds., Recognition of Fluvial Depositional Systems and Their Resources Potential. Soc. Econ. Paleont. min., No. 19, 33-81.
- Ministry of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1977) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, Phase I and II, Landsat-Data Analysis. Aerial photography and Airborne Magnetic Survey.
- Ministry of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1978a) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, Phase II 1-2 and Phase III 1-2. Aerial Photography and Airborne Magnetic Survey.
- Ministry of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1978b) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, Phase IV 1. Photo Geological Survey.
- Ministry of Mines, Directorate General of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1979) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, Phase IV 2. Geological Survey.
- Smith, G. A. (1986) Coarse-grained non-marine volcaniclastic sediments: terminology and depositional processes. Geol. Soc. Am. Bull. 97, 1-10.
- Suetrisno, Supriatna, S., Rustandi, E. and Sanyoto, P. (1994) Geological map of the Buntok Quadrangle, Kalimantan (1 : 250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).
- Sumartadipra, A. S. and Margono, U. (1996) Geological map of the Tewah Quadrangle, Kalimantan (1 : 250,000). Geological Research and Development Centre (GRDC).
- Supriatna, S., Sudradjat, A. and Abidin, H. Z. (1995) Geological map of the Muarotewe Quadrangle, Kalimantan (1 : 250,000). Geological Research and Development Center (GRDC).

2004년 7월 19일 원고접수, 2004년 10월 14일 게재승인.