

Metamorphism (변성작용)

Introduction

Metamorphism

- 정의: 속성작용 및 풍화작용보다 높고 용융작용 (아나텍시스; anatexis) 보다 낮은 온도와 압력 조건에서 암석의 조직과 구성광물이 변화하는 작용

- 변성암(metamorphic rock): **변성작용으로 형성되는 암석**

기존의 화성암과 퇴적암, 그리고 변성암이 열과 압력을 받아 새로운 암석으로 변환 암석

• 저온 한계는 속성작용??

속성작용과 변성작용 사이의 경계는 임의적(점이적)

- 속성/풍화작용은 변성작용과 구분이 모호.
- 변성작용 시작 온도: 100-150°C, 원암(protolith) 타입에 따라 다름.
- 지올라이트(zeolites) : 속성작용으로 형성, 변성작용으로도 생성되었다고 보는 견해도 있음

변성작용의 요소(T, P, X)와 변화

- 온도(Temperature): 변성작용에서 전통적으로 가장 중요한 요소

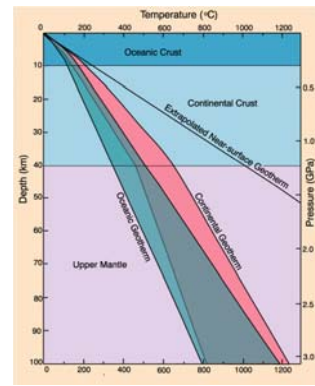


Figure 1-9. Estimated ranges of oceanic and continental steady-state geotherms to a depth of 100 km using upper and lower limits based on heat flows measured near the surface. After Sclater *et al.* (1980), *Earth, Rev. Geophys. Space Sci.*, 18, 269-311.

압력의 종류

- 지하 3.3 km 당 0.1 Gpa (=1 kbar) 증가
- 정압압 (Lithostatic pressure) : 고체 암석을 매체로 하여 생긴 정압. 정수압과 본질적으로 같음 (hydrostatic)
- 편압 (Deviatoric stress) = 서로 다른 방향에서 작용하는 압력이 같지 않은 압력.

편압 (인장력)

Tension: σ_3 is negative, and the resulting strain is extension, or pulling apart

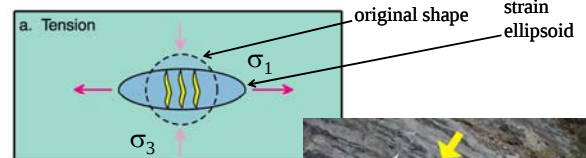


Figure 21-2. The three main types of deviatoric stress with an example of possible resulting structures. a. Tension, in which one stress is negative. "Tension fractures" may open normal to the extension direction and become filled with mineral precipitates. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



편압 (압축력)

Compression: σ_1 is dominant, $\rightarrow$ **folding** or more homogenous **flattening**

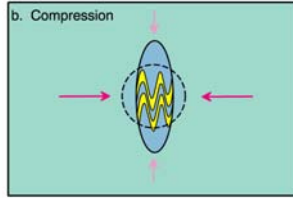


Figure 21-2. The three main types of deviatoric stress with an example of possible resulting structures. b. Compression, causing flattening or folding. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, Prentice Hall.



편압 (전단력)

Shear motion occurs along planes at an angle to σ_1

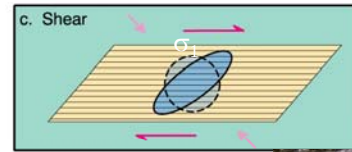
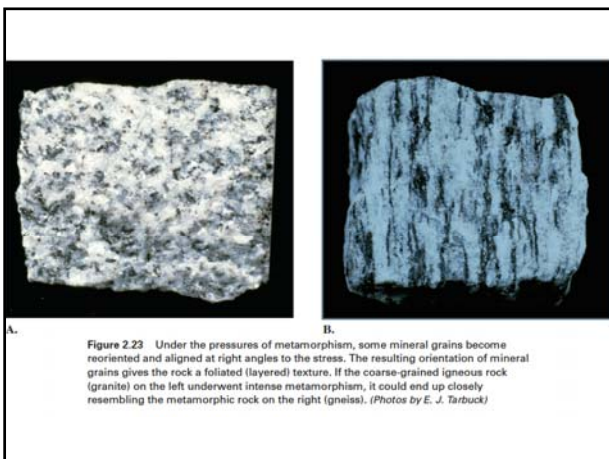
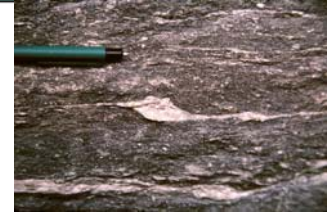


Figure 21-2. The three main types of deviatoric stress with an example of possible resulting structures. b. Shear, causing slip along parallel planes and rotation. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, Prentice Hall.

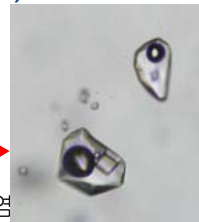


변성작용의 요소(T, P, X)와 변화

유체 (Fluids; composition; **X**)

변성유체의 존재 증거:

- 유체 포유물 $\rightarrow$
- 유체는 수화광물 또는 탄산염 광물을 형성함.
- 휘발성분이 필요한 반응이 발생.



변성작용의 형태

- **접촉변성작용** (Contact Metamorphism)
- **광역변성작용** (Regional Metamorphism)
- 열수 변성작용(Hydrothermal Metamorphism)
- 단층대 변성작용(Fault-Zone Metamorphism)
- **충격 변성작용**(Impact or **Shock Metamorphism**)

A Classification of Metamorphic Rocks

변성암의 분류

A Classification of Metamorphic Rocks

- 변성암의 분류: 조직(texture)와 성분(composition)을 기본으로 분류
- 화성암과는 달리, 변성암의 이름은 매우 단순한 경우가 많다.
- 원암에 따라서 다양한 암석이 존재.
- 점두 및 점미어에 중요 광물 이름 또는 특이한 조직적 양상을 강조.

변성암의 원암

-퇴적암(Sedimentary rocks)

- 셰일 (Shales; 이질암; Pelitic rocks)
- 사암 (Sandstones; Arenaceous rocks and semipelitic rocks)
- 탄산염암 (Carbonate; Calcareous rocks)
- 이회암 (marl rocks)

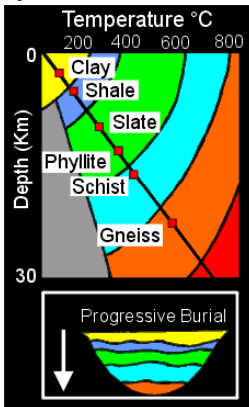
-화성암

- 염기성 화성암 (Basic igneous rocks; metabasites)
- 초염기성암 (Ultramafic rocks)
- 화강암질 암(Granitoid rocks)

변성 이질암 (Metapelites)

Shales (Pelites): 세립질의 퇴적암. 주로 다양한 원소로 구성된 규산질 점토광물이 풍부하다 (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , K_2O , Na_2O , H_2O).

- 변성도에 따라서 다양한 구조/조직
- 일반적으로 다양한 변성광물이 변성정도에 따라서 산출됨.
- Quartz (모든 P, T 조건에서 다양하게 형성)
- Feldspars (plagioclase, K-feldspars)
- Mica (sericite, muscovite, biotite, chlorite)
- 석류석 (garnet)
- 십자석 (staurolite)
- 근청석 (cordierite)
- Al-silicate (andalusite, kyanite, sillimanite)
- Pyroxene



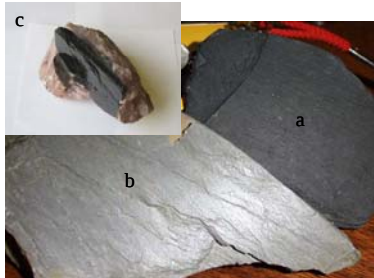
엽리나 선구조를 갖는 암석

- 변성이질암류에는 엽리와 선구조를 갖는 암석이 다양하게 존재함.
- 엽리 (Foliation): 평판형 석리 (fabric)
- 선구조 (Lineation): 선형 석리
- 외력을 받았다는 증거임.

벽개 (Cleavage)

- ☞ 전통적으로 암석의 준 평행내지 평행한 쪼개짐을 의미함. = 구조 (점판암, 천매암)
- ☞ 광물에서 쪼개짐도 이에 해당됨 (예, 흑운모의 벽개, 방해석의 벽개) = 조직
- ☞ 조직과 구조의 경계에 해당되는 용어

- 점판암 (Slate):** 벽개(점판벽개)가 잘 발달한 세립질의 변성암. 표면에 일부 광물의 배열이 관찰됨 (편리)
- 천매암 (Phyllite):** 세립질의 벽개가 매우 잘 발달. 벽개 표면에는 판상광물 (sericite/phengite and/or chlorite)이 배열하여 광택이 남.
- 흑운모 (Biotite):** 편상의 벽개가 잘 나타나는 광물



편리 (Schistosity)

- ☞ 변성 과정에서 형성된 광물의 집합체의 배열 또는 광물 입자들의 배열
- ☞ 배열된 광물들은 맨눈으로 충분히 관찰 가능
- ☞ 방향성은 일반적으로 평판형(엽리)이나 선구조(lineation)도 포함됨.



편암 (Schist): 편리가 발달한 암석.
사진: 편암내의 석류석 편경

편마 구조 (Gneissose structure)

- 변성작용에 의해 층(layer)이 형성되거나 편리가 덜 발달된 것.
- 편마암은 일반적으로 조립질.

편마암 (Gneiss): 편마구조가 발달한 암석을 통칭. 층이 발달하며 이 층은 밝은 상성 광물의 집합체와 어두운 염기성 광물의 집합체가 교대로 나타난다.



혼펠스(Hornfels)

이질암이 열변성을 받은 것

혼펠스: 깨진 파단면이 소의 불의 파단면과 유사



대리암 (Marble):

주로 방해석(calcite; CaCO_3)으로 구성된 석회암 (limestone)이나 고회석 [dolomite; $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 구성된 고회암 (dolostone)이 변성을 받아 형성됨.

다양한 변성환경에서 형성됨

대리암: 대부분 유백색이 특징. 일부 변성의 흔적이 발견되지 않는 경우도 많음.



(a) Limestone (fossiliferous)



(b) Marble



규암 (Quartzite):

원암: 주로 석영으로 구성된 암석. 전형적으로 규질 사암 퇴적암석자들은 변성을 받지 않은 순수한 석영 사암을 규암이라고 부르기도 함.

변성도: 다양한 변성환경에서 형성



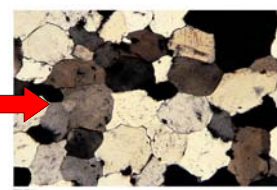
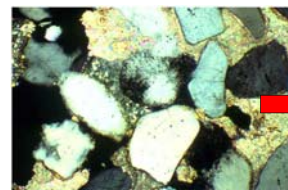
규암: 대부분 유백색이 특징. 불순물에 따라서 다양한 색 관찰



(b) Quartz Sandstone



(a) Quartzite



변성 엽기성 화성암

현무암과 반려암이 속해 있는 엽기성암류는 규소 함량이 적은 화성암이며 사장석과 휘석을 다량 포함함.

- 엽기성화성암의 변성작용은 변성엽기성암(metabasites)을 들며 다양한 광물(quartz, plagioclase, amphiboles, garnet, epidotes, chlorite)을 포함하고 있다.
- 변성정도에 따라 변성상(metamorphic facies)를 정의하는 암석으로 변한다.(청색편암, 각섬암, 에클로자이트, 녹색편암 등)
- 만일 이 암석이 사장석과 각섬석으로 구성되어 있다면 각섬암(amphibolites)이라는 형식이 쓰임.

녹색편암/녹색암(Greenschist/Greenstone):

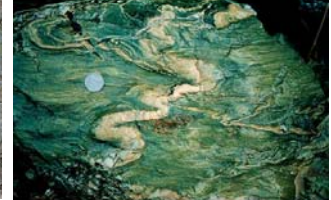
변성도 : 저변성

구성광물 : 녹니석, 액티놀라이트, 녹염석, 조장석 (녹색의 광물들로 인해서 생성된 이름)

원암: 엽기성 화성암 or 잡사암 (graywacke)



녹색암



녹색편암 : 녹니석이 대부분을 차지

각섬암(Amphibolite): (cf. 각섬석암; hornblendite)

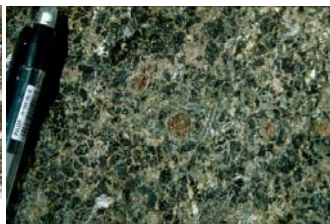
구성광물: 각섬석 + 사장석 (대략 1:1)

각섬석류: 방향성이 있거나 없을 수도 있음.

원암: 엽기성 화성암 or 잡사암



박편사진



각섬암

청색편암(Blueschist):

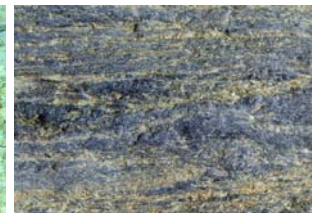
생성환경 : 고압 변성작용

주구성광물: 청색 각섬석(Na-amphibole; glaucophane).

원암 : 엽기성 화성암



청색편암의 박편사진



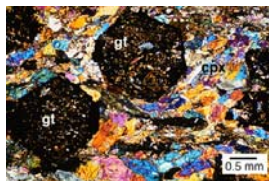
청색 편암의 노두 사진

에클로자이트 (Eclogite):

생성환경 : 초고압 변성작용(판의 충돌경계)

주요광물 : 녹색 내지 적색의 변성암류로 주로 단사휘석 (omphacite)과 석류석(garnet)으로 구성됨.

원암: 현무암질 암석



에클로자이트의 박편사진



에클로자이트

백립암 (Granulite):

니질, 엽기성, 또는 석영-장석질 모암이 고온 변성작용을 받아 형성됨.

OH-free minerals로 구성됨. 백운모는 없으나 사장석과 사방휘석은 흔한편



혼성암 (Migmatite):

1-10 cm scale 단위로 불균질한 우흑질부 (*melanosome*)와 밝은색의 규질부분 (우백질부; *leucosome*). 그리고 회색의 중간부분 (*mesosome*)으로 구성됨.

층이 발달되며, 우백질부(melt origin)는 다양한 형태의 맥상으로 나타나기도 함.



안구상 (augen) :

일부 편마암에 눈 모양의 입자(commonly feldspar)가 존재하며, 이는 원암의 거대 결정들이 전단작용에 의해 형성된 것. **augen**은 독일어의 eyes.



Figure 23-18. Augen Gneiss. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

High Strain Rocks

Table 22-1. Classification of High-Strain Fault Zone Rocks

% fine matrix	Rocks without primary cohesion	Rocks with primary cohesion		
		Non-foliated	Foliated	Glass in matrix
50	Fault breccia	Microbreccia	Protomylonite	Pseudotachylite
70			Mylonite	
90	Fault gouge	Cataclastite	Ultramylonite (if significantly recrystallized)	

After Higgins (1971)

Chapter 22: High Strain Rocks

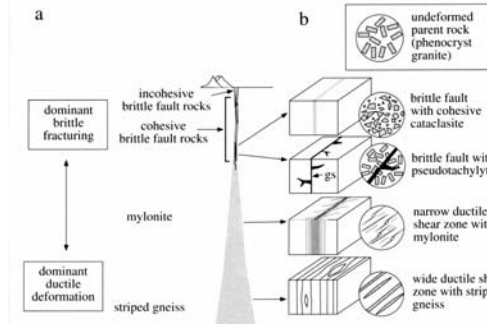


Figure 22-2. Schematic cross section through a shear zone, showing the vertical distribution of fault-related rock types, ranging from non-cohesive gouge and breccia near the surface through progressively more cohesive and foliated rocks. Note that the width of the shear zone increases with depth as the shear is distributed over a larger area and becomes more ductile. Circles on the right represent microscopic views or textures. From Passchier and Trouw (1996) *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin.

High Strain Rocks



Figure 22-4. Shatter cones in limestone from the Houghton Structure, Northwest Territories. Photograph courtesy Richard Grieve, © Natural Resources Canada.

변성암 개괄 정리

무변성 (원암)	현무암	점토질 퇴적암	석회암/ 고회암	사암	
광역변성	저	녹색편암/녹색암	점판암/천매암	대리암	규암
	중	각섬암	편암	대리암	규암
	고	편마암/혼성암	편마암/혼성암	대리암	규암
접촉변성 (contact)	백립암	그라노펠스/ 혼펠스/백립암	대리암	규암	
고압변성 (충돌대 관련)	청색편암/ 에클로자이트	편암	대리암	규암	
고압변성 (단층 관련)	암쇄암(mylonite), 안구상 편마암 등				