

마그마관입에 의한 상부퇴적층의 변형에 관한연구

민 경 덕* · 김 원 영*

A Study on the Structural Deformations in the Sedimentary Layer Resulted from Magma Intrusion

Min, Kyung Duck.* Kim Won Young*

Abstract

The earth's crust is unceasingly undergoing deformations because of the forces acting upon it. The relationship between the tectonic forces and the resulting deformations are found from the states of stresses in the earth's crust induced by these forces. The study has been attempted to analyze the deformations of the overlying sedimentary layers, which are deformed by the magma intrusion along its lower boundary. The elastic model is constructed to analyze the geologic structures, by means of the theory of elasticity, and then the appropriate boundary conditions are given.

The solution of the Airy stress function which satisfies the given boundary conditions is derived from the analytic method. The internal stress distributions of the deformed elastic model layer are portrayed by principal stress trajectories, and then the corresponding potential faults and joints systems are predicted from the Coulomb-Mohr failure criterion. The internal displacement distributions are shown by the calculated displacement components vectors, namely horizontal, vertical and net components. Results of the numerical calculations show the developments of some geologic structures as follows;

- (1) one set of shear joints and or two sets of shear joints which are opposite directions, and one set of extension joints parallel to the σ_1 direction,
- (2) one set of high angle thrusts and normal faults,
- (3) symmetric fold; both limbs are dipping in opposite direction with low angle.

The field work at the Wall-A San area, located near Jinju City, in southern Korea, had accomplished to compare the field structures with the predicted ones. The results of the comparison exhibits the developments of joint and fault systems satisfactorily consistent with each others. But the area does not show any type of folding, in spite of the intrusion of a granodiorite massif, this fact is one of the important features of the whole Kyungsang sedimentary basins of Mesozoic age distributed at the south-eastern parts of Korea. For this reason, it is thought that the magma intrusion had occurred with extremely low pressure.

The geologic structures have been modified by the erosion and weathering throughout the geologic time, and the conditions of the sedimentary layers (width, thickness and radius of magma) are not the same as before, being intruded by the magma. To enlighten this, it is preferable to study these geologic structures with analyses of various types of rheological models.

* 연세대학교 지질학과, Dept. of Geology, Yonsei University, Korea

1. 서론

지각은 그에 작용하는 힘(tectonic force)에 의해 끊임없이 변형(deformation)을 일으키고 있으며, 이러한 변형은 습곡(folding), 단층(fault), 절리(joint) 등 지질구조 생성에 원인이 된다. 이 힘의 근원에 대해서는 여러가지 학설이 있으나 아직도 연구와 논의의 과정에 있다. 지각에 작용한 힘과 이 힘에 의한 구성암석의 변형을 연구하는 많은 지구 물리학자들과 구조지질 학자들은 탄성론(Theory of Elasticity)과 암석역학(Rock Mechanics)의 이론 및 지각변형의 모델실험을 통해 지질구조의 다각적 분석에 노력하고 있다. 왜냐하면 지각에 작용한 힘과 생성된 변형 사이의 정량적인 관계는 이 힘에 의해 생기는 지각내의 응력상태(state of stress)에 의해 알 수 있기 때문이다.

본 연구는 지각 심부에서의 마그마관입(magma intrusion)에 의한 상부퇴적층의 변형에 관한 이론적인 고찰로서, 균질한(homogeneous) 퇴적층하부 경계면에 관입하는 마그마의 힘에 의해 퇴적층내에 유도되는 응력분포(stress distribution)와 생성된 지질구조의 관계를 일반탄성론을 2차원화하여 응용 하므로써 역학적으로 해석 하려는데 그 목적이 있다. 퇴적층은 경계면에 작용하는 힘에 의해 그 내부의 응력분포가 변화하게 되며, 우리는 퇴적층의 모양(두께 및 폭), 구성암석의 물리적 성질, 작용한 힘이나 변위(displacement)의 크기 등을 알게 되면, 그 내부응력분포의 고유한 양상(pattern)을 알아 낼 수 있다. 이것은 응력분포와 작용한 외력, 물질분자의 변위 사이의 관계를 표시하는 역학적 법칙이 단 한가지 방법으로만 만족되기 때문이다. (Ramsay, 1967, p. 289).

따라서 본 논문은 고유한 응력분포의 양상을 알기위해서

- (1) 힘(force), 응력(stress) 및 응력변형(strain)에 대한 기본개념 및 법칙을 논하고,
- (2) 지질학적으로 실제성이 있으며, 수학적 취급이 가능한 rheological elastic model을 설정하고,
- (3) 고유한 경계조건(boundary condition)을 만족시키는 응력함수(stress function)의 해를 구하고,
- (4) 응력분포와 변위를 계산하여 도표로 나타내고,
- (5) 응력분포와 변위를 근거로 습곡, 단층 및 절리 등의 지질구조를 예측하고,
- (6) 조건이 유사한 지역의 지질구조와 비교 토의한다.

본 논문에서 사용한 용어의 정의는 다음과 같다(Timoshenko & Goodier, 1970,)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 각각 x, y, z 축에 평행하게 작용하는 수직 응력 성분 (normal stress components)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: 전단 응력 성분 (shearing stress component)

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 각각 최대, 중간, 최소 주응력 (maximum, intermediate and minimum principal stress)

u, v, w : 각각 x, y, z 축 방향으로의 변위 성분

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: 각각 x, y, z 축 방향으로의 응력변형 성분 (strain; unit elongation in the x, y and z direction)

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$: 전단 변형 성분 (shear strain)

E : Young's modulus ($E=1 \times 10^{10}$ newton/m²)

ν : Poisson's ratio ($\nu=0.25$)

$P(x)$: 마그마압력 (magma pressure, $P=1$ kilobar = 1×10^8 newton/m²)

2 지질구조의 수치해석

2-1 마그마 관입에 대한 고찰

마그마의 관입은 지각구조 변형에 큰 영향을 미치는 요소이며 조산운동에 수반되어 지하 수 km 내지 수십 km, 혹은 지표 가까이 까지 관입하여 주위의 지층을 변형시키거나 모양을 변질 시킨다. 이러한 지층의 변형과 모양의 변질은 관입하는 마그마의 크기(size), 모양(shape), 화학성분 및 물리적 특성등에 의해 좌우되며 특히 구조적인 변형은 관입하는 마그마의 모양에 크게 지배된다.

관입암체를 G. K. Gilbert (1877)에 의한 ideal Laccolith와 같이 생각하면 (그림 1), 마그마는 dike 형태의 통로를 따라 상승하여 지층사이의 약한 부분이 저항력이 더 강한 층에 이르러 옆으로 퍼져서 버섯모양의 형태를 나타내게 되며, 위에 놓인 퇴적층은 상승되어 휘어져서 습곡현상을 보여준다.

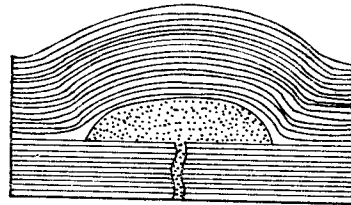


그림 1 Ideal Laccolith

마그마는 유체(fluid) 상태로서 그 압력은 정역학적(static)이며, 따라서 Laccolith 표면에서 그위의 지층을 향하여서는 어디에서나 수직으로 똑같은 압력을 가하

고 있다(A. M. Johnson, 1970, p. 41). 이는 Bottomless stock의 경우에도 동일하게 생각할 수 있다.

본 연구에서는 마그마 관입에 수반되는 마그마 압력(magma pressure)에 의한 상부 퇴적층의 변형을 역학적으로 해석하기 위해 관입체의 모양은 gate function형이고, 마그마 압력은 위로 향하는 model을 설정하였다(그림 2).

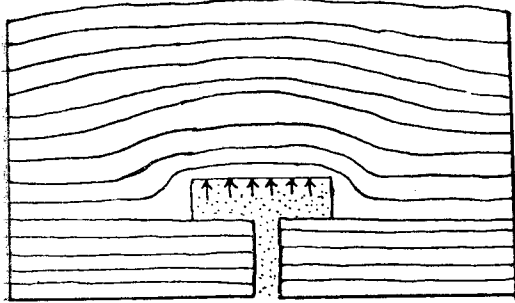


그림 2 마그마 관입 모델

2-2. 기본 개념 및 범칙

(1) 힘, 응력 및 응력변형

흔히 힘과 응력은 동의어 처럼 사용되고 있으나, 두 개념은 차이가 있다. 힘(F; force)은 질량 m인 물체가 가속도 a를 가지고 운동할 때 생긴 크기와 방향을 가진 vector 량으로 정의된다. 즉 Newton의 제 2법칙에 의하여 $F=m \cdot a$ 로 정의되며, 작용하는 방향에 따라 압축력(compression), 장력(tension), 짝힘(couple), 염력(torsion) 등으로 구분한다(그림 3)

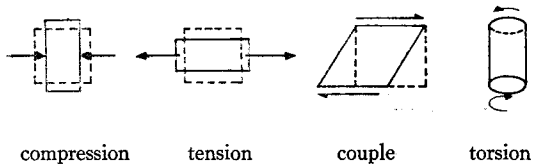


그림 3 힘

이에 반해 응력(S; stress)은 단위면적당에 작용하는 힘 즉, $S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \Delta F / \Delta A$ 로 정의되며, 단면적에 수직하게 작용하는 성분 σ_n (인장응력 : tensile stress, 또는 압축응력 : compressive stress)과 면에 평행하게 작용하는 접선성분 τ_n (전단응력 : shearing stress)으로 나눌 수 있다. 또한 응력성분은 육면체의 각면에 작용하는 성분으로 분해하여 나타내거나(그림 4) 응력타원체(stress ellipsoid) (그림 5)로 나타낼 수 있으며, 수학적으로는 대칭텐서로서 (symmetric tensor of second order) (1)식과 같이 표기할 수 있다.

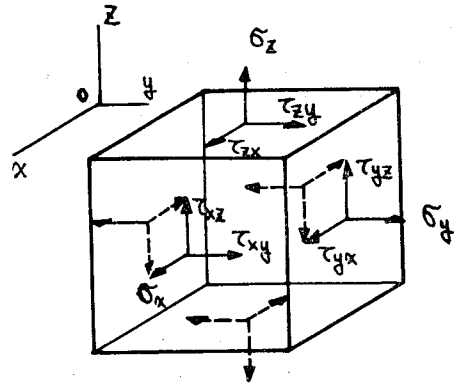


그림 4 육면체의 응력 성분

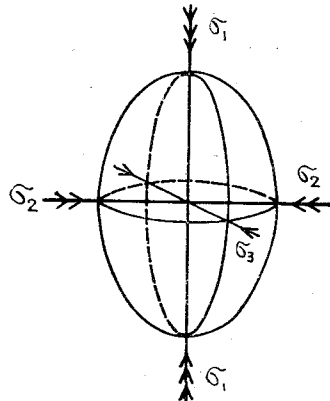


그림 5 응력타원체

$$\tau_{ij} = \begin{vmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{vmatrix} \quad \begin{matrix} i=1, 2, 3 \\ j=1, 2, 3 \end{matrix} \quad (1)$$

한편 응력변형(strain)은 물체가 응력의 작용으로 물체내의 각점들이 변위를 일으키게 되어 물체의 모양과 크기가 변하게 되는 변형(deformation)이라고 정의된다.

물체에서는 2종류의 응력변형이 일어나며, 하나는 단위 길이당의 늘어남이나 줄어듦과 같은 길이응력변형(ϵ ; longitudinal strain) 즉, $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 이고, 다른 하나는 두 선들이나 두 면들이 이루는 각이 변하는 것으로 전단 응력변형(γ ; shear strain) 즉, ϕ 가 angular shear 라면, $\gamma = \tan \phi$ 이다. 변위의 x, y, z 축에 대한 성분들 각각 u, v, w라고 하면, 응력변형 성분과 변위성분 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \tau_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned}$$

$$\tau_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

또한 응력 변형성분과 응력성분 사이에는 Hooke의 법칙으로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 완전탄성 (perfect elasticity)

본 논문에서의 지질구조의 역학적인 해석 방법은 탄성론에 근거한다. 따라서 탄성론을 지질구조에 적용시키기 위해서는 구조적 변형을 받는 지층이,

- ① 탄성체 (elastic body) 일 것. 즉, 물질구조를 변형시키는 힘이 어떤 한계를 넘지 않으면 그 힘이 제거 된후에 원형으로 돌아가는 성질을 지니며
- ② 균질체 (homogeneous body) 일 것. 즉, 그 체적 내에서는 어느 부분에서든지 물리적 성질이 똑같고
- ③ 등방체 (isotropic body) 일 것. 즉, 그 내부에서는 어느 방향으로든지 물리적 성질이 똑같다는 3가지 가정이 필요하다.

(3) 평면응력변형 (plane strain)

앞의 가정에도 불구하고 3차원의 지질구조 문제의 수치해석 방법에 탄성론을 적용시키기는 매우 어렵다. 왜냐하면, 해석과정중 수학적 취급이 극히 복잡하기 때문이다. 따라서 그림 6에서 보는 바와 같이 x, y, z 세 축을 잡고 지층하부 경계에서 xy축의 방향으로만 변위가 일어나고 또한 변위는 z축의음의 무한대에서 양의

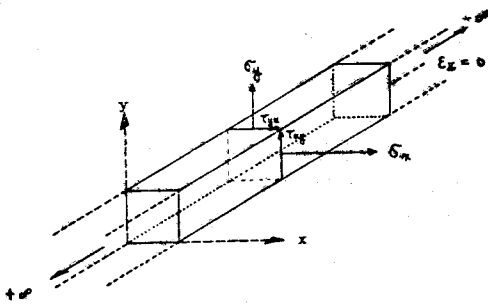


그림 6 평면응력변형 (plane strain)

무한대까지에 걸쳐서 모든 xy 단면에서 동일하다고 하면 모든 xy 단면은 동일한 조건이 되고 한 단면은 양쪽의 단단한 고정 단면들 사이에 끼인 것 같이 되어 z 축 방향으로의 변위가 일어나지 않는다고 생각할 수 있

게 된다. 이렇게 해서 우리는 3차원의 지질구조 문제를 2차원화 할 수 있다. 따라서 습곡, 단층등의 긴 구조의 문제는 임의의 단면에서의 응력분포 및 변위를 2차원에서의 탄성론을 적용하여 해석할 수 있게 된다 (A. M. Johnson, 1970, pp. 289)

평면 응력변형에서 z축 방향의 응력변형은 0이므로 변위성분 u, v는 z축과 무관하며 x, y만의 함수가 된다 따라서 (2)식의 응력 변형성분은 다음 세 성분만 남게 된다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4)$$

또한 (3)식의 세번째 식은 $\epsilon_z = 0$ 이므로

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0 \text{에서}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

가 된다.

따라서 2차원에서의 Hooke의 법칙에 의한 응력성분과 응력 변형성분 사이의 관계는

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x(1-\nu^2) - \nu(1+\nu)\sigma_y] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y(1-\nu^2) - \nu(1+\nu)\sigma_x] \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \quad (5)$$

2-3 Airy Stress Function

2차원에서 y축을 아래로 잡고 단위 부피당의 물체의 질량 (즉 밀도)을 ρ 라고 하면 평형의 미분방정식은 다음과 같이 된다 (Timoshenko and Goodier, 1970, pp. 26-28).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho g &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

주어진 힘을 받고 있는 물체내의 응력상태를 결정하는 것은 탄성론의 기본문제이다. 2차원문제에서 응력 변형성분은 (4)식의 세 성분만 남게되며, (4)식의 응력 변형-변위의 방정식에서 응력변형성분은 변형을 정의하는 연속함수 $u(x, y), v(x, y)$ 로 표시되며 따라서 세 응력변형성분들은 서로 독립적이지 않고 연관되어 있다. 즉 (4)식의 각항을 x, y로 각각 미분하여 합해 주면,

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (7)$$

이 미분관계를 compatibility condition 이라한다.

또한 응력성분의 compatibility equation은 (5)식을 (8)식에 대입하고 (6)식의 평형의 미분 방정식을 사용하면,

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)(\sigma_x + \sigma_y) = -\frac{1}{(1-\nu)} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y}\right) \quad (8)$$

Body force가 0 이면 즉 $X=Y=0$ 이면

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)(\sigma_x + \sigma_y) = 0 \quad (9)$$

평형의 미분방정식, 경계조건 및 (9)식의 compatibility equation은 2 차원문제에서 응력분포를 결정하는데 충분한 system을 이루며, 그 해는 주어진 경계조건과 compatibility equation을 만족시키는 평형의 미분 방정식(6)을 풀어서 얻을 수 있다. 이를 푸는 일반적인 방법중의 하나로서 x 와 y 의 함수인 새로운 함수 $\phi(x, y)$ 를 도입하는 것이며, 이 함수 $\phi(x, y)$ 를 Airy stress function 이라한다. $\phi(x, y)$ 는 평형의 미분 방정식으로 부터 응력 성분과는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \rho g h \\ \sigma_y &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \rho g h \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 평형의 미분 방정식을 만족하는 (10)식으로 부터 $\phi(x, y)$ 에 대한 다양한 해를 얻을 수 있다. 그러나 문제에서 요구되는 해는 compatibility equation을 동시에 만족시켜야 하므로 (10)식을 compatibility equation (9)식에 대입하면, 함수 $\phi(x, y)$ 는 다음식을 만족 시켜야 함을 알 수 있다(Timoshenko and Goodier, 1970, p. 32).

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} \\ &= \nabla^4 \phi(x, y) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 물체의 무게가 단지 body force 만인 경우에 2 차원 문제의 해는 주어진 경계 조건을 만족시키는 (12)식의 biharmonic differential equation의 해를 구하는 것이 된다. 따라서 $\phi(x, y)$ 는 (12)식을 만족시키는 biharmonic function이며 일반적으로 (10)식의 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 를 취하여 적당한 $\phi(x, y)$ 를 선택하므로써 경계면에서의 이론적인 응력분포를 결정한다. 2 차원 문제의 해로 대수적 다항식 (algebraic polynomial)을 택하거나 또는

다른 방법으로 해를 취할 수 있으나 삼각다항식 (trigonometric polynomial)을 취하는 것이 보다 유용하다. (M. Filonenko-Borodich, 1965, p. 371)

식(12)의 특수해 (particular solution)를 구하기 위하여 변수분리법 (separation of variables)을 이용하면

$$\phi(x, y) = X(x) Y(y) \quad (13)$$

$X(x)$ 의 일반해는

$$X(x) = K_1 \cos \lambda x + K_2 \sin \lambda x \quad (13a)$$

$Y(y)$ 의 일반해는

$$Y(y) = (A + Cy) \cosh \lambda y + (B + Dy) \sinh \lambda y \quad (13b)$$

따라서 $\phi(x, y)$ 의 특수해는 (13a)식과 (13b)식 으로부터

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= (K_1 \cos \lambda x + K_2 \sin \lambda x) \\ &\quad \{ (A + Cy) \cosh \lambda y + (B + Dy) \sinh \lambda y \} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 K_1, K_2, A, B, C, D 는 임의의 상수 (arbitrary constants)들이고, 경계조건에 의해 결정되어 진다. 이 식은 선형 (linear) 이므로 해의 합도 또한 해가 된다. 따라서 (14)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \sum_{n=1}^{\infty} (K_1 \cos \lambda n x + K_2 \sin \lambda n x) \cdot \\ &\quad \{ (A_n + C n y) \cosh \lambda n y + (B_n + D n y) \sinh \lambda n y \} \end{aligned} \quad (15)$$

2-4 Elastic Model

Lacchoith 형태의 마그마 관입에 의한 상부 퇴적층의 변형에 대한 문제를 풀기 위해 두께가 $2H$ 이고, 폭이 $2L$ 인 지층 모델을 설정하고 x, y, z 세축을 그림 7과 같이 잡으면, 지층은 z 축 방향으로 무한히 길게 된다. 여기서 $-H$ 는 지표면, H 는 지층의 하부 경계면, a 는 마그마변경, $-P(x)$ 는 지층의 하부 경계면에 수직하게 y 축의 방향으로 작용하는 마그마압력이다.

(1) Elastic Model의 경계조건

첫째, 지표상부에 있는 공기는 강성을 (rigidity)이 0 이고, 따라서 전단응력을 유지할 수 없으므로 지표에서의 전단응력 τ_{xy} 는 어디에서나 0이다. 다음으로, 지표면에 내려누르는 수직압력은 대기압의 수직성분인데 이 힘은 지각내의 내부응력 (internal stress)에 비하면 매우 적은 값이다. 그러므로 우리는 일반성을 벗어나지 않고 이 작은 값을 무시 할 수 있다. 이와같이 하여 지각표면에서의 전단 응력과 수직응력에 대한 두 경계 조건이 결정된다.

둘째, 지층 하부경계면에서는 마그마압력이 작용하

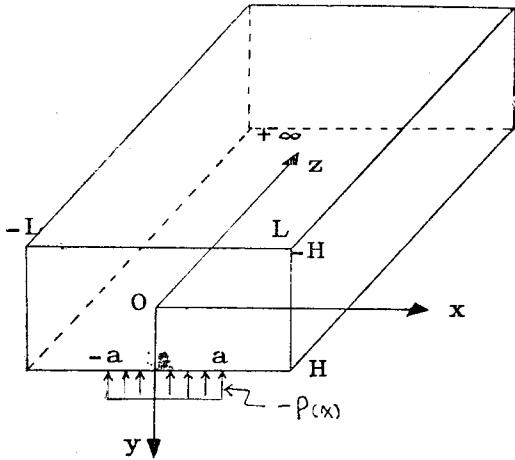


그림 7 Elastic Model

는 범위 ($x=\pm a$)는 유체 마그마와 지층사이의 마찰력이 작용하지 않는 접촉면 이므로 전단응력 τ_{xy} 는 0이고, 그 이외의 부분은 단순한 지층 사이의 접촉면으로서 이곳에서의 전단응력 τ_{xy} 또한 0이다. 다음으로 수직응력은 마그마 압력 $-P(x)$ 이다.

세째, 중심단면과 양 끝 ($x=\pm L$)에서의 조건을 생각하면, 지층모델의 중심과 양 끝단면에서는 회전이 없으므로 τ_{xy} 는 0이다.

위의 경계 조건들을 요약하여 수식화 하면,

① $y=-H$ (지표면에서)

$$\sigma_y(x, -H) = 0, \tau_{xy}(x, -H) = 0$$

② $y=H$ (지하경계면에서)

$$\sigma_y(x, H) = -P(x), \tau_{xy}(x, H) = 0$$

$$\text{여기서 } -P(x) = \begin{cases} -P_0; & |x| \leq a \\ 0; & |x| > a \end{cases}$$

③ $x=0$ 및 $x=\pm L$ 에서

$$\tau_{xy}(0, y) = 0, \tau_{xy}(\pm L, y) = 0$$

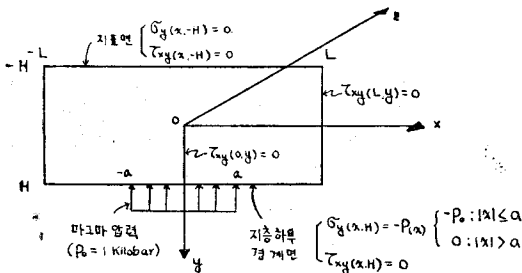


그림 8 경계조건

네째, 지각 내부의 압력 분포는 일반적으로 중력 가속도와 상부 지층의 두께와 밀도의 영향을 받으며, 따

라서 깊이에 따라 증가 한다.

$$\text{즉, } dp = g \rho dy$$

여기서 g ; 중력가속도 ($9.8 \text{m} \cdot \text{sec}^{-2}$)

ρ ; 지각 구성암석의 밀도 ($\rho \approx 3.0 \text{gm/cm}^3$)

dy ; 지표로부터의 심도 즉 지층의 두께

따라서 두께 2km인 지층 하부의 압력은,

$$i = 980 \text{cm/sec}^2 \times 3.0 \text{gm/cm}^3 \times 2 \text{km}$$

$$\approx 0.588 \times 10^{10} \text{dyne/cm}^2 \approx 0.588 \text{ kilobar}$$

관입 마그마가 상부 지층을 밀어 올리는 경우에 밀어 올리는 힘은 마그마 압력 P 이고, 이 값은 상부 지층이 지구중심을 향해 작용하는 수직 압력 (약 0.6 kilobar)보다 커야한다(Bullen, 1965, pp. 226-239).

여기서 압력의 단위는, 1 kilobar = 10^9bar

$$= 1 \times 10^{12} \text{dyne/cm}^2$$

$$= 1 \times 10^8 \text{newton/m}^2$$

(2) 경계조건을 만족 시키는 stress function $\phi(x, y)$

응력함수 $\phi(x, y)$ 의 임의의 상수들 K_1, K_2, An, Bn, Cn, Dn 는 앞의 경계조건에 의해 구해진다. 앞의 경계조건 ③으로부터

$$\tau_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} (-K_1 \sin \lambda nx - K_2 \cos \lambda nx) [An \sinh \lambda ny + Bn \cosh \lambda ny + Cn (\cosh \lambda ny + \lambda ny \sinh \lambda ny) + Dn (\sinh \lambda ny + \lambda ny \cosh \lambda ny)] = 0$$

윗식은 상수 K_1, K_2 를 다음과 같이 취하면 만족된다

$$K_1 = 1, K_2 = 0, \lambda = \frac{n\pi}{L}$$

여기서 n 은 양의 정수이다.

따라서 함수 $\phi(x, y)$ 를 특수해의 꼴로 나타내면

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda nx \cdot [An \cosh \lambda ny + Bn \sinh \lambda ny + Cny \cosh \lambda ny + Dny \sinh \lambda ny] \quad (16)$$

남은 임의의 상수 An, Bn, Cn, Dn 을 구하기 위해 먼저 (16)식을 응력성분과 $\phi(x, y)$ 와의 관계를 나타내는 (10)식에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda nx [An \lambda n \cosh \lambda ny + Bn \lambda n \sinh \lambda ny + Cn \lambda n (2 \sinh \lambda ny + \lambda ny \cosh \lambda ny) + Dn \lambda n (2 \cosh \lambda ny + \lambda ny \sinh \lambda ny)] \quad (17)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = - \sum_{n=1}^{\infty} \lambda^2 n \cos \lambda nx [An \cosh \lambda ny + Bn \sinh \lambda ny + Cny \cosh \lambda ny + Dny \sinh \lambda ny] \quad (18)$$

$$\tau_{xy} = - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda n \sin \lambda nx [An \lambda n \sinh \lambda ny + Bn \lambda n \cosh \lambda ny + Cn (\cosh \lambda ny$$

$$+ \lambda n y \sinh \lambda n y) + Dn (\sinh \lambda n y + \lambda n y \cosh \lambda n y) \quad (19)$$

경계조건 ①과 ②의 $\tau_{xy}(x, -H) = 0$, $\tau_{xy}(x, H) = 0$ 을 (19)식에 대입하면.

$$-An\lambda n \sinh \lambda n H + Bn\lambda n \cosh \lambda n H + Cn (\cosh \lambda n H + \lambda n H \sinh \lambda n H) + Dn (\sinh \lambda n H + \lambda n H \cosh \lambda n H) = 0$$

$$An\lambda n \sinh \lambda n H + Bn\lambda n \cosh \lambda n H + Cn (\cosh \lambda n H + \lambda n H \sinh \lambda n H) + Dn (\sinh \lambda n H + \lambda n H \cosh \lambda n H) = 0$$

따라서

$$Cn = -Bn \frac{\lambda n \cosh \lambda n H}{\cosh \lambda n H + \lambda n H \sinh \lambda n H}$$

$$Dn = -An \frac{\lambda n \sinh \lambda n H}{\sinh \lambda n H + \lambda n H \cosh \lambda n H}$$

또한 경계조건 $\sigma_y(x, -H) = 0$, $\sigma_y(x, H) = -P(x)$ 을 (18)식에 대입하면,

$$-\lambda^2 n \cos \lambda n x [An \cosh \lambda n H - Bn \sinh \lambda n H - CnH \cosh \lambda n H + DnH \sinh \lambda n H] = 0$$

$$-\lambda^2 n \cos \lambda n x [An \cosh \lambda n H + Bn \sinh \lambda n H + CnH \cosh \lambda n H + DnH \sinh \lambda n H] = -P(x) \quad (20)$$

여기서 $-P(x)$ 를 주기가 $T=2L$ 인 Fourier 급수로 전개하면,

$$-P(x) = \frac{P_0 a}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2P_0}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (21)$$

(20)식의 두번째 식을 orthogonality 를 이용하기 위해 양변에 $\int_0^L \cos \lambda m x dx$ 를 곱하고 다시 쓰면

$$\lambda^2 n [An \cosh \lambda n H + Bn \sinh \lambda n H + CnH \cosh \lambda n H + DnH \sinh \lambda n H] \cdot \frac{L}{2} = \int_0^L P(x) \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad (22)$$

식(21)을 (22)식의 우측항에 대입하고, 그 결과를(22)식과 (20)식에 대입하면,

$$An \cosh \lambda n H - Bn \sinh \lambda n H - CnH \cosh \lambda n H + DnH \sinh \lambda n H = 0$$

$$An \cosh \lambda n H + Bn \sinh \lambda n H + CnH \cosh \lambda n H + DnH \sinh \lambda n H = \frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \quad (23)$$

따라서 주어진 경계조건을 만족 시키는 임의의 상수 An, Bn, Cn, Dn 은 (19)식과 (23)식을 연립하여 풀어서 다음과 같다.

$$An = \frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \cdot \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \left[\frac{\sinh \lambda n H + \lambda n H \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H + 2\lambda n H} \right]$$

$$Bn = \frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \cdot \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \left[\frac{\cosh \lambda n H + \lambda n H \sinh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right]$$

$$Cn = -\frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \cdot \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \left[\frac{\lambda n \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right]$$

$$Dn = -\frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \cdot \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \left[\frac{\lambda n \sinh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H + 2\lambda n H} \right] \quad (24)$$

따라서 위의 상수들을 (16)식에 대입하여 정리 하면 응력함수 $\phi(x, y)$ 는,

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \cos \lambda n x \cdot \left(\frac{2P_0 L^2}{n^3 \pi^3} \right) \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right) \cdot \left[\frac{(\sinh \lambda n H + \lambda n H \cosh \lambda n H) \cosh \lambda n y}{\sinh 2\lambda n H} - \frac{-\lambda n y \sinh \lambda n H \sinh \lambda n y}{+ 2\lambda n H} + \frac{(\cosh \lambda n H + \lambda n H \sinh \lambda n H) \sinh \lambda n y - \lambda n y \cosh \lambda n H}{2\lambda n H - 2\lambda n H} \cosh \lambda n y \right] \quad (25)$$

(3) 응력 성분 (stress component)

경계조건을 만족시키는 (24)식의 임의의 상수들과 (25)식의 응력함수를 가지고 응력성분들을 나타내면 응력성분은 (17), (18) 및 (19) 식으로부터,

$$\sigma_x = \sum_{n=1}^{\infty} F \cdot \cos \lambda n x \left\{ \frac{(\lambda n H \cosh \lambda n H - \sinh \lambda n H)}{\sinh 2\lambda n H} + \frac{\cosh \lambda n y - \lambda n y \sinh \lambda n y}{2\lambda n H} + \frac{(\lambda n H \sinh \lambda n H - \cosh \lambda n H) \sinh \lambda n y - \lambda n y \cosh \lambda n y \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right\} \quad (26)$$

$$\sigma_y = -\sum_{n=1}^{\infty} F \cdot \cos \lambda n x \cdot \left\{ \frac{(\lambda n H \cosh \lambda n H + \sinh \lambda n H)}{\sinh 2\lambda n H} + \frac{\cosh \lambda n y - \lambda n y \sinh \lambda n y \sinh \lambda n H}{2\lambda n H} + \frac{(\lambda n H \sinh \lambda n H + \cosh \lambda n H) \sinh \lambda n y - \lambda n y \cosh \lambda n y \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \cosh \lambda n y \right\} \quad (27)$$

$$\tau_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} F \cdot \sin \lambda n x \cdot \left\{ \frac{\lambda n H \cosh \lambda n H \sinh \lambda n y - \sinh \lambda n y \cosh \lambda n y \sinh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H + 2\lambda n H} + \frac{\lambda n H \sinh \lambda n H \cosh \lambda n y \sinh \lambda n y \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right\} \quad (28)$$

여기서

$$F = \frac{2P_0}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi a}{L}\right)$$

(4) 변위성분

경계조건을 만족시키는 변위성분 $u(x, y)$ 및 $v(x, y)$ 는 앞의 (4)식과 (5)식의 응력성분과 응력변형 성분의 관계에 (26), (27) 및 (28)식을 대입하고, 각각 x, y 에 대하여 적분 함으로써 얻을 수 있다.

즉,

$$u(x, y) = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} F \cdot \frac{1}{\lambda n} \cdot \sin \lambda n x \cdot \left[\frac{(\lambda n H \cosh \lambda n H - \sinh \lambda n H) \cosh \lambda n y - \sinh 2\lambda n H + (\lambda n y \sinh \lambda n y - 2\nu \cosh \lambda n y) \sinh \lambda n H + (\lambda n H \sinh \lambda n H - \cosh \lambda n H) \sinh \lambda n y - \sinh 2\lambda n H (\lambda n y \cosh \lambda n y - 2\nu \sinh \lambda n y) \cosh \lambda n H}{-2\lambda n H} \right] + f(y) \quad (29)$$

$$v(x, y) = -\frac{(1+\nu)}{E} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} F \cdot \frac{1}{\lambda n} \cdot \cos \lambda n x \cdot \left[\frac{(\lambda n H \cosh \lambda n H + 2 \sinh \lambda n H) \sinh \lambda n y}{\sinh 2\lambda n H} - \frac{(\lambda n y \cosh \lambda n y + 2\nu \sinh \lambda n y) \sinh \lambda n H}{2\lambda n H} + \frac{(\lambda n H \sinh \lambda n H + 2 \cosh \lambda n H) \cosh \lambda n y}{\sinh 2\lambda n H} - \frac{(\lambda n y \sinh \lambda n y + 2\nu \cosh \lambda n y) \cosh \lambda n H}{-2\lambda n H} \right] + g(x) \quad (30)$$

여기서 $f(y), g(x)$ 는 임의의 적분함수이다.

2-5 수치해석

수치해석을 위하여 지층 모델의 크기를 두께 ($2H$)는 2km, 폭 ($2L$)은 12km, 및 관입 마그마의 반경 (a)을 3km로 하였으며, 관입 마그마의 압력 (P_0)은 앞에서 언급한 대로 1 kilobar로 하였다. 또한 Young's modulus (E)는 $E=1 \times 10^{10}$ newton/m², poisson's ratio (ν)는 0.25로 하였다.

설정된 지층모델(그림 9)은 y 축에 대해 대칭이므로 x 의 (+)방향만을 취하여, x 축 방향으로 0.5km, y 축 방향으로는 0.25km의 간격으로 격자점을 잡고, 각 점에서의 변위와 응력분포를 계산하였다.

(1) 주 응력 궤도 곡선 (Principal stress trajectories)

변형을 받은 지층 내부의 응력 분포는 서로 직각인 한쌍의 주응력 궤도 곡선으로 나타 낼 수 있다. 그중 하나는 Max. principal stress인 σ_1 의 방향을 나타내는 곡선이고, 다른 하나는 Min. principal stress인 σ_3 의 방향을 나타내는 곡선이다.

임의의 한 점에서의 σ_1 과 σ_3 의 방향은 이들 주응력 궤도 곡선에 접선 방향이며 다음 식으로부터 구할 수 있다(Timoshenko & Goodier, 1970, p. 24).

$$\tan 2\beta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (31)$$

여기서 β 는 x 축의 (+)방향과 주응력이 이루는 각이다. 위의 (31)식에 경계조건에 의해 이미 결정된 (26), (27) 및 (28)식의 응력성분을 대입하고 정리하면,

$$\tan 2\beta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \lambda n x}{\cos \lambda n x} \cdot \left[\frac{\lambda n H \cosh \lambda n H \sinh \lambda n y - \lambda n y \cosh \lambda n y \sinh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H + 2\lambda n H} + \frac{\lambda n H \sinh \lambda n H \cosh \lambda n y - \lambda n y \sinh \lambda n y \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right] \left[\frac{\lambda n H \cosh \lambda n H \cosh \lambda n y - \lambda n y \sinh \lambda n y \sinh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H + 2\lambda n H} + \frac{\lambda n H \sinh \lambda n H \sinh \lambda n y - \lambda n y \cosh \lambda n y \cosh \lambda n H}{\sinh 2\lambda n H - 2\lambda n H} \right] \quad (32)$$

식(32)에서 볼 수 있는 바와 같이 주 응력 궤도 곡선은 Young's modulus (E) 및 Poisson's ratio (ν)에는 무관하고, 단지 지층의 폭 ($2L$)과 두께 ($2H$)의 영향만을 받는다. 각 점에서 β 의 값은 (32)식에 의해 $n=5$ 까지를 전자 계산기로 계산하였다.

계산된 각 점에서의 β 의 값을 그리면, 지층 내부의 응력 궤도 곡선은 그림 9와 같으며 σ_1 을 나타내는 곡선은 마그마 압력이 작용하는 경계면 부근에 밀집되어 나타나고, σ_3 를 나타내는 곡선은 커다란 호를 그리며 분포한다.

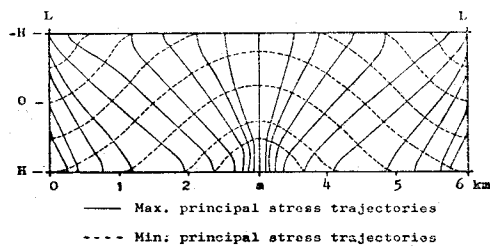


그림 9 주 응력 궤도 곡선 (Principal stress trajectories)

(2) 변위분포

변형을 받은 지층에서 어느 일점의 x 방향의 변위성분 $u(x, y)$ 와 y 축 방향의 변위성분 $v(x, y)$ 는 (29), (30)식으로 부터 구해진다. 앞의 응력분포를 구할때와 같은 방법으로 각 점의 변위성분들을 $n=5$ 까지 전자계산기로 계산하였다. 여기서 변위에 영향을 주는 요소

는 변위에 관한 (29), (30)식에서 알 수 있는 바와 같이 Young's modulus (E), Poisson's ratio (ν) 지층의 두께와 폭 및 마그마압력 (P_0) 등이다. 계산된 각 점에서의 변위 성분은 변위 벡터 (displacement vector)로 나타낼 수 있으며, 각 변위 벡터의 방향과 길이는 각 점에서의 변위 방향과 크기를 나타낸다.

① 변위의 수평 성분

각 점에서 x 의 축 방향으로의 변위 성분 $u(x, y)$ 를 변위 벡터로 나타내면 그림 10a와 같다.

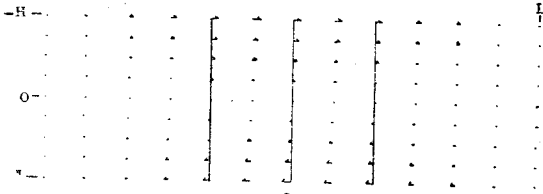


그림 10a 변위의 수평성분

변위의 수평성분의 크기는 마그마 압력이 작용하는 경계면 $\pm a$ 에서 가장 크며, 중심 $x=0$ 과 양끝 $x=\pm L$ 에서 가장 작다. 또한 지표면 ($y=-H$)과 지층하부 경계면 ($y=H$)에서 가장 크며, 지층의 중간($y=0$)을 향해 점점 작아진다. 또한 변위의 방향은 지층 하부에서는 압력 P_0 가 작용하는 안쪽으로 향하며, 지층 상부에서는 압력 P_0 가 작용하는 바깥쪽으로 향한다.

② 변위의 수직 성분

각 점의 y 축 방향으로의 변위 성분 $v(x, y)$ 를 변위 벡터로 나타내면 그림 10b와 같다. 변위의 수직성분의 크기는 $\pm a$ 에서 가장 작고, 양끝 $x=\pm L$ 과 중심 $x=0$ 에서 가장 크며, $\pm a$ 를 향해 점점 작아진다. 또한 변위의 방향은 $\pm a$ 를 기준으로 하여 그 안쪽에서는 지표를 향하며, 그 바깥쪽에서는 지층 하부 경계면을 향한다.

③ 총 변위 분포

변위의 수평성분과 수직성분을 벡터 합성하여 지층 내의 총변위 분포를 나타낼 수 있으며 이는 그림 10c와 같다.

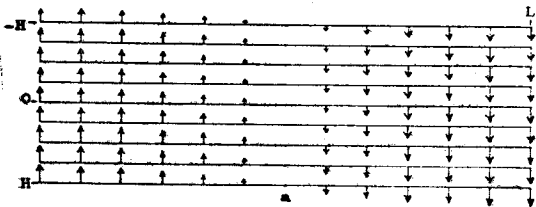


그림 10b 변위의 수직성분

지층 하부 경계면에 반경 $a(3km)$ 인 마그마가 관입하여, 압력 $P_0(1 kbar)$ 로 작용했을 경우 각점의 총변위

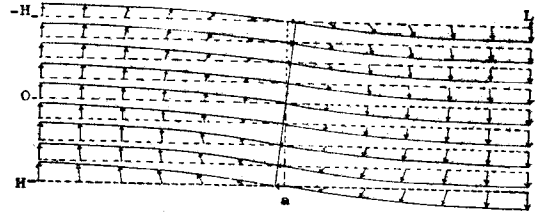


그림 10c 총 변위 분포 (Net displacement distribution)

성분을 연결한 곡선은 위의 그림과 같이 습곡을 보여 준다. 습곡은 anticlinal axis가 중심 $x=0$ 에 위치하고, synclinal axis가 양 끝 $x=\pm L$ 에 위치하는 대칭 습곡 (symmetrical fold)이며, limb의 경사는 변위의 수직성분의 변화가 적으므로 극히 완만하다.

2-6 Model 내의 예상 지질 구조

(1) 균열 (fracture)의 발달

지각에 응력이 작용하여 내부물질이 결합력 (cohesion)을 잃고, 어떤면을 따라 서로 분리되면 균열이 발달하게 되고 파열이 일어난다. 생성된 균열의 크기는 현미경 하에서 관찰되는 소규모에서, 수 백 km에 달하는 단층과 같이 나타나기도하며, 균열면 (fracture plane) 양쪽의 분리가 Max. principal stress 방향과 평행인 인장 균열 (extension fracture)과 Max. principal stress와 임의의 각(일반적으로 $20^\circ \sim 30^\circ$)을 이루는 하나 또는 한쌍의 전단균열 (shear fracture)의 두가지 형태로 발달된다.

균열면을 따라서 block의 이동이 전혀 없거나, 극히 적으면 이것은 joint로 나타나고, 전단균열을 따라 상대적인 운동이 일어나면 단층과 같은 지질구조가 발달하게 된다.

① 인장균열 (extension fracture)

봉압 (confining pressure)이 0인 상태하에 있는 육면체에 Max. compressive principal stress (σ_1)가 수직하게 작용하고, Min. tensile principal stress (σ_3)가 수평으로 작용하면 인장균열이 σ_1 에 평행하고, σ_3 에 수직하게 발달한다. 그러나 실제 지각에서는 어느곳에서나 봉압이 작용하므로 인장균열은 이미 발달한 전단균열이나 crack에 수반되어 발달한다 (Badgley, 1965, p. 10)

수치해석 결과로 얻어진 응력분포 (그림 9)에 대해서도 인장균열의 발달이 예상되며, 이 예상균열은 σ_1 에 평행하게 $x=\pm a$ 부근에 밀집되어 발달한다 (그림 11). 왜냐하면 이곳에는 응력이 밀집되어 있기 때문이다.

② 전단 균열 (shear fracture)

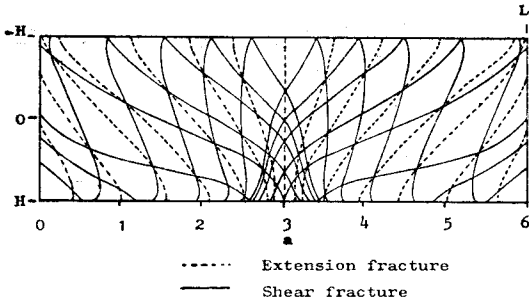


그림 11 예상 균열 (Potential fracture)

Compressive stress (σ_1)이 지층에 수직하게 작용하면 전단균열은 전단응력 τ_n 이 가장 크고, 동시에 수직 응력 σ_n 이 가장 작은 면에 평행하게 발달한다. 즉 σ_1 과 전단면 (shear plane)이 이루는 각 $\theta=45^\circ$ 일때 전단응력 τ_n 은 최대가 되고, 이 면을 따라 균열이 일어나게 된다. (Coulomb-Mohr failure criterion). 그러나 실제로는 이 각 θ 는 45° 보다 적은 값이 된다. 왜냐하면 실제 균열이 일어나는 각 θ 는 물질의 결합력과 내부 마찰계수에 좌우되기 때문이다. 각 암석에 대한 각 θ , 내부마찰각 ϕ 및 전단강도 등은 봉압하에서 압축 강도 시험에 의해 얻어지며 (Handin & Hager Jr., 1957), 시험결과 각 θ 는 암석에 따라 각각 다르나 평균 약 30° 정도이고, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta = \pm \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (33)$$

따라서 수치해석에서 구한 응력분포에 대해 예상되는 전단균열을 그려보면 σ_1 에 30° 를 이루는 면을 따라서 발달된다(그림 11). 또한 전단 균열을 따라 block의 이동이 있을 경우에는 thrust, strike slip 및 normal fault 등의 단층의 발달이 예상된다. 앞의 그림 11의 예상 균열에서 볼 있는 예상단층 중 하나는 normal fault로 $\pm a$ 부근에서 경사가 급하고 중심과 양끝 ($\pm L$)을 향하여 경사가 완만해진다. 또 다른 하나는 high angle thrust로 경사는 비교적 변화가 적다.

(2) 습곡의 발달

변위분포(그림 10a, b, c)에서와 같이 마그마 관입에 의한 압력 P_0 에 의해 지층은 습곡을 받는다. 습곡은 그림 12과 같이 배사구조(anticline)이며, 배사축은 지층 모델의 중심인 $x=0$ 이고, 배사축을 중심으로 양쪽 limb이 서로 반대방향으로 경사하는 대칭습곡을 보여 준다 또한 향사축은 모델의 양쪽 끝인 $\pm L$ 에 놓인다.

Limb의 경사는 변위의 수직성분의 변화가 적으므로 완만하고, 관입 마그마의 압력 P_0 의 크기에 따라 경사가 좌우된다.

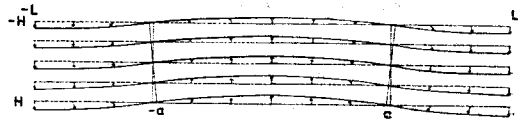


그림 12 습곡의 발달

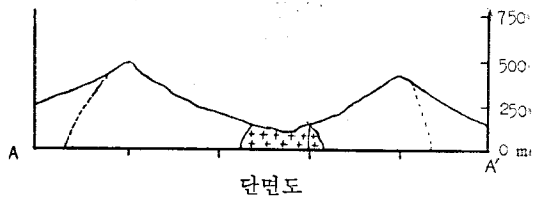
3. 야의 지질구조

3-1. 대상지역의 지질개설

수치해석 방법에서 설정된 Laccolith 형태의 화성암 관입체에 의해 그 상부에 놓인 퇴적층의 변형이 실제 야의 지질구조와 잘 일치하는지를 검토하기 위해 적당한 지역을 선정 조사 하였다(김 옥준, personal commun.).

대상지역은 비교적 지질구조가 단순한 경상남북도에 걸쳐 분포하는 중생대 경상계 지역중 설정된 지층 모형과 유사한 진주도폭 동남단 진주시에서 동쪽 10km 정도에 위치하는 경남 진양군 진성면의 월아산 지역을 택하였다.

월아산 지역은 경상계 신라통의 신라역암과 그 위를 덮고 있는 사질세일의 함안층으로 구성되어 지층의 주향은 NS-N30E 경사는 10SE 정도이고 화강섬록암의 관입을 받고있다. (그림 13)



3-2. 지질 구조

월아산 지역은 주위보다 높은 능선이 말발굽 모양으로 지형을 이루고 있으며 그 중앙부에는 화강섬록암이 관입하고 있다. 말발굽 모양의 산릉은 호운펠스질 암류로 구성되어 있고, 중앙에는 화강섬록암이 계곡을 이루며 분포한다. 이러한 지형은 화강섬록암체의 관입에 의해 상부 퇴적층이 dome의 형태로 상승하여 생긴 것처럼 나타난다. 그러나 이 지역 도폭 조사자(김옥준의 2인, 1969)들은 이러한 지형이 중심부의 화강섬록암체 관입으로 주위 모암이 접촉변질을 받아 호운펠스화되었고, 따라서 주위지층보다 풍화침식에 강하여 높은 산릉을 이루게 되고, 침식에 약한 화강섬록암은 더 빨리 심하게 침식되어 타원형의 깊은 골짜기를 만드는차별 침식에 의해 형성 되었다고 보았다.

절리의 발달은 140개소의 절리들의 주향을 Rose dia-

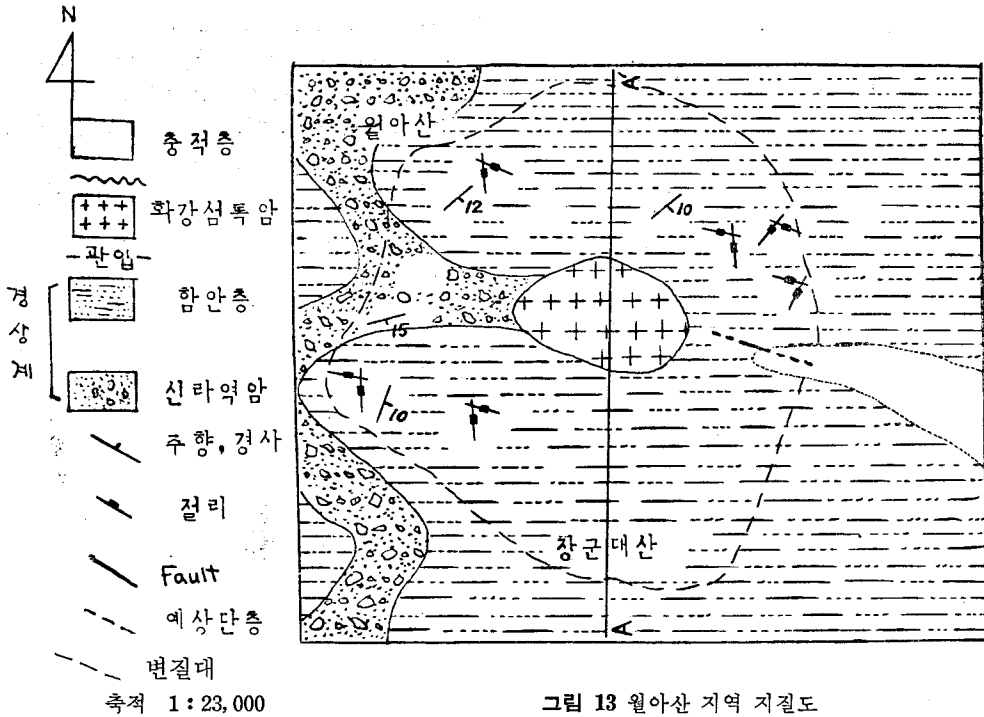


그림 13 월아산 지역 지질도

gram으로 나타낸 것 같이, N80W와 N10W의 거의 수직한 한쌍의 절리가 우세하게 발달되었고, N50E 정도의 거의 수직한 절리가 함께 나타난다.

단층은 주향이 N70W인 단층이 발달되어 있으며, 단층면을 따라서 약 8m의 수평이동을 보여주고 있음이 관찰된다. 동시에 단층면을 따라 상하운동도 예상되나 야외에서는 확실히 관찰되지 않는다. 또한 1m의 수평 이동을 보여주는 N55E 방향의 단층이 함께 발달한다. 이 방향들은 절리의 방향과도 일치하며, 더욱

제 4 장 토 론

Elastic model study에서 마그마 압력에 의해 상부 퇴적층은 그림 12과 같이 습곡을 일으키나, 월아산 지역에서는 습곡이 일어나지 않았다. 따라서 이것은 마그마의 관입이 마그마 압력이 적은 형태로 일어났거나, 월아산 지역이 변위가 거의없는 관입마그마의 edge(그림 10c) 부근에 해당되는 것처럼 생각된다. 모양이 변형을 받고있지 않음은 경상계 지역의 특징의 하나로 마그마가 주위 모양에 큰 변형을 일으키지 않고 조용히 관입하고 있다.

또한 월아산 지역의 절리는 거의 수직으로 발달하고 있으며, N70W의 방향으로 발달한 수평이동 단층도 단층면의 경사가 거의 수직이므로, 수직균열을 따라 이동한 것으로 생각된다. 따라서 이 지역의 fracture pattern은 수직한 경사로 발달되며, elastic model에서의 예상 전단 균열중 수직하게 나타나는 균열에 대응된다. 한편 이 지역의 말발굽 모양의 지형은 차별침식과 함께 수직하게 발달하는 전단균열 및 N70W 방향의 수평이동 단층의 영향을 받아 형성된 것으로 생각된다.

그러나 조사지역인 월아산 일대가 좁은 지역이어서 elastic model의 수치해석 결과와 비교가 힘들므로, 지질구조의 역학적 해석을 위해서는 보다 넓은 지역의 지

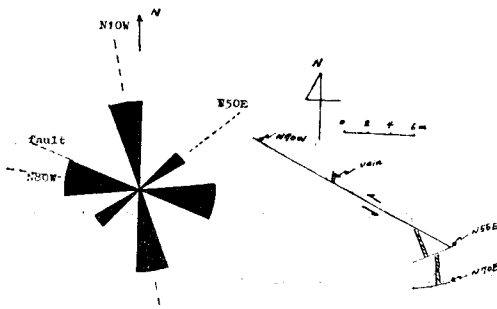


그림 14 Rose digram of joint

기 우세한 N70W 방향은 달음산고개와 중앙부의 계곡을 잇는 방향이며, 이방향으로 유로가 발달되어 있다.

질구조와의 비교가 바람직하다.

제 5 장 결 론

마그마 관입에 의한 상부 퇴적층의 변형에 대한 Elastic model study에서 얻은 결과 및 실제야의 지질구조와의 비교로부터 얻은 결과는 아래와 같다.

1. 대칭 습곡의 발달이 예상되며, limb의 경사는 마그마 압력의 크기(magnitude)에 따라 완만하게 변한다.
2. 균열은 관입마그마의 edge에서 가장 밀집되어 발달하고, 그 중심부와 외곽을 향하여 적게 발달된다. 따라서 수직하는 하나의 shear joint 군과 관입 마그마의 edge에서 중심과 외곽을 향해서 완만한 경사를 가진 다른 하나의 shear joint 군 및 extension joint 군의 발달이 예상된다.
3. 하나의 전단균열을 따라서 high angle thrust가 발달하고, 다른 하나의 전단균열과 인장균열을 따라서

normal fault의 발달이 예상된다.

4. 실제 지질구조는 형성후 풍화 침식되어 마그마 관입 당시의 퇴적층의 두께를 정확히 알 수 없으므로, elastic model의 두께, 폭, 마그마 관입환경 등이 각각 다른 여러가지 모양의 모델을 설정하여 역학적인 해석을 하고, 넓은 지역의 지질구조와 비교하여야 실제 지질구조의 역학적인 해석이 더욱 좋은 결과를 얻게 될 것이다.

5. 본 논문에서는 고유한 마그마 관입 model 및 경계조건을 설정하고 이의 역학적 해석을 하였다. 유도한 응력함수와 응력성분 및 변위성분을 나타내는 식들은 지층의 두께, 폭 및 관입마그마의 크기와 압력들을 변수로 하는 일반식이다. 그러므로 위의 변수들이 각각 다른 마그마관입에 의한 지질구조들에 대해서도 그의 응력분포와 변위 분포는 곧 계산되며, 따라서 역학적인 해석에 지침을 줄 수 있다.

참 고 문 헌

- Arfken, G., 1970, *Mathematical Methods for Physicists*, 2nd ed., Academic Press, Inc., New York.
- Badgley, P. C., 1965, *Structural and Tectonic Principles*, Harper and Row, Ltd., New York.
- Billings, M. P., 1972, *Structural Geology*, 3rd ed., Prentice-Hall, Inc., New York.
- Bullen, K. E., 1965, *An Introduction to the Theory of Seismology*, 3rd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Clark Jr., S. P., 1966, *Handbook of Physical Constants*, rev., The Geol. Soc. of Am., New York.
- Filonenko-Borodich, M., 1965, *Theory of Elasticity*, Dover Publications, Inc., New York, pp. 171-188.
- Gilbert, G. K., 1877, Report on the geology of the Henry Mountains, U.S. Geogr. and Geol. Surv., Rocky Mtn. Region, p. 160.
- Hafner, W., 1951, "Stress distributions and faulting", *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 62, pp. 373-398.
- Hubbert, M. K., 1951, "Mechanical basis for certain familiar geologic structure", *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 62, pp. 356-372.
- Jaeger, J. C., and Cook, N. G. W., 1969, *Foundamentals of Rock Mechanics*, Methuen & Co., Ltd., London.
- Johnson, A. M., 1970, *Physical Processes in Geology*, Freeman, Cooper & Co., San Francisco.
- Kreyszig, E., 1972, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Obert, L., and Duvall, W. I., 1967, *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rocks*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Price, N. J., 1966, *Fault and Joint Development in Brittle and Semibrittle Rock*, Pergamon Press, Ltd., Oxford.
- Ramsay, J. G., 1967, *Folding and Fracturing of Rocks*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Sanford, A. R., 1959, "Analytical and experimental study of simple geologic structure", *Geol. Soc. Am., Bull.*, Vol. 70, pp. 19-52.
- Sneddon, Ian N., 1951, *Fourier Transforms*, McGraw-Hill Book Co., Inc., pp. 395-510.
- Sokolnikoff, I. S., and Redheffer, R. M., 1958, *Mathematics of Physicists*, Academic Press, Inc., New York.
- Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, pp. 1-64.
- 김 옥준 외 2인, 1969, *진주도폭설명서*, 국립지질조사소.