

### 3 축응력상태에서 자름파렬형성특징

김동철, 리광철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학기술부문에서 첨단돌파전을 힘있게 벌려야 하겠습니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

많은 경우 자름파렬형성에 대하여 고찰할 때 중간주응력  $\sigma_2$  는 아무런 역할도 하지 못하며 자름파렬면에  $\sigma_2$  축이 놓인다고 보았다. 그러나 선행연구들[1, 2]에서는  $\sigma_2$  축이 자름파렬형성에서 일정한 역할을 하며 일부 경우에는 자름파렬면에  $\sigma_2$  축이 놓이지 않는다고 보고있다. 그러므로 우리는 3축응력상태에서 자름파렬형성에 가장 유리한 면이 어떤 면이며 자름파렬면에  $\sigma_2$  축이 놓이지 않는것은 어떤 경우인가 하는것을 수값모의를 통하여 평가하였다.

#### 1. 수학적모형설정

자름파렬형성에 가장 유리한 면을 결정하기 위한 수학적모형은 다음과 같다.

$$\sigma_s - \mu\sigma_n \Rightarrow \max \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 내부마찰계수,  $\sigma_n$ 은 법선응력이고  $\sigma_s$ 는 접선응력으로서 3축응력상태에서 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_n = \sigma_0 n \quad (2)$$

$$\sigma_s = \sigma_0 n - [n^T \sigma_0 n] n \quad (3)$$

여기서  $\sigma_0 = \text{diag}(1, \Phi, 0)$ ,  $n$ 은 면의 단위법선벡토르,  $\Phi$ 는 주응력비로서 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

우리는 론의를 간단히 하기 위하여 주응력계와 지리적자리표계를 일치시켰다. 즉  $\sigma_1$  축은 북-남방향,  $\sigma_2$  축은 동-서방향,  $\sigma_3$  축은 연직방향으로 고정시켰다. 그러면 식 (1)을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$\sigma_s - \mu\sigma_n = ([\sigma_0 n - [n^T \sigma_0 n] n]^T [\sigma_0 n - [n^T \sigma_0 n] n])^{1/2} - \mu[n^T \sigma_0 n] \quad (4)$$

#### 2. 수값모의결과

식 (4)의 최대값을 해석적방법으로 결정하는것은 어렵다. 그렇기때문에 우리는 주응력비의 값을 변화시키면서 식 (4)의 값이 최대로 되는 면의 놓임상태를 결정하였다.(그림)

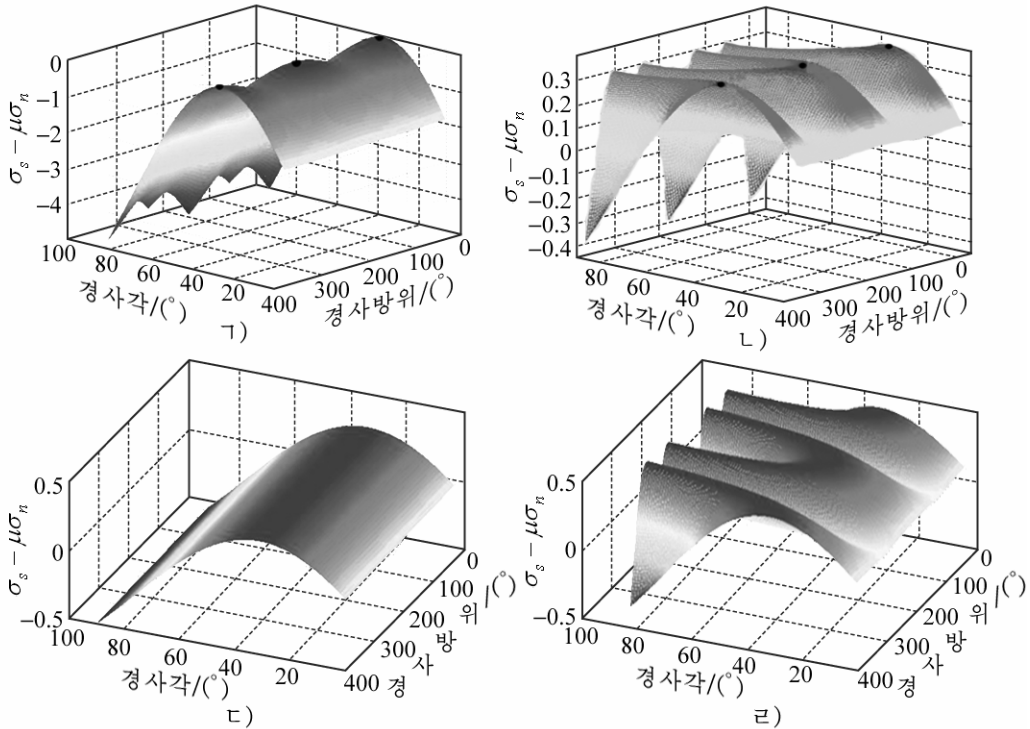


그림. 자름파렬형성에 가장 유리한 면의 놓임요소

ㄱ)  $\mu = 0.5, \Phi = 0.9$ , ㄴ)  $\mu = 0.5, \Phi = 0.1$ , ㄷ)  $\mu = 0.5, \Phi = 1$ , ㄹ)  $\mu = 0.5, \Phi = 0$

그림 ㄱ), ㄴ)에서 보는바와 같이 놓임요소가  $180^\circ \angle 32^\circ, 360^\circ \angle 32^\circ$ 인 면들에서 자름파렬형성가능성이 가장 높다는것을 알수 있다. 이 면들은  $\sigma_2$  축을 포함하며  $\sigma_1$  축과  $32^\circ$ 로 사귈다.(이때 자름파렬면이  $\sigma_1$  축과 사귀는 각은 내부마찰계수에 거꿀비례한다.) 이로부터  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 의 조건이 성립하는 3축응력상태에서 자름파렬이 일어날수 있는 면은 2축응력상태의 경우와 같이 2개라는것을 알수 있다.

그림 ㄷ)에서 보는바와 같이  $\Phi = 1$ 인 경우 경사각이  $32^\circ$ 인 모든 방위의 면들에서 자름파렬이 생겨날수 있다는것을 알수 있다. 다시말하여  $\sigma_1 = \sigma_2$ 인 경우 경사각은 같지만 경사방위가 각이한 자름파렬들이 하나의 응력상태에서 형성될수 있다. 또한 그림 ㄹ)에서 보는바와 같이  $\Phi = 0$ 인 경우 자름파렬이 형성될수 있는 면들의 놓임요소는  $0^\circ \angle 32^\circ \sim 60^\circ \angle 90^\circ, 120^\circ \angle 90^\circ \sim 180^\circ \angle 32^\circ, 180^\circ \angle 32^\circ \sim 240^\circ \angle 90^\circ, 300^\circ \angle 90^\circ \sim 0^\circ \angle 32^\circ$ 의 구간에 놓인다. 이로부터  $\Phi$  값이 0 혹은 1과 근사할 때 매질의 불균일성을 비롯한 여러가지 조건들에 의하여  $\sigma_2$  축이 놓이지 않는 여러가지 면들을 따라 자름파렬이 발달할수 있다는것을 알수 있다.

## 맺는 말

2축응력상태와 마찬가지로 3축응력상태에서도  $\sigma_s - \mu\sigma_n$ 이 최대인 면을 따라 자름파렬이 발달한다.

$\Phi$  값이 0 혹은 1과 근사할 때 매질의 불균일성을 비롯한 여러가지 조건들에 의하여 자름파렬들은  $\sigma_2$  축이 놓이지 않는 면들에 발달할수 있다. 그러나  $0 < \Phi < 1$ 인 경우에 균질매질에서는 2개의 공액자름파렬만이 형성된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Alan P. Morris; Journal of Structural Geology, 31, 950, 2009.  
[2] Bezalel Haimson; Journal of Structural Geology, 32, 1701, 2010.

주체106(2017)년 1월 5일 원고접수

**Characteristics of Shear Fracturing in 3 Axes-Stress State**

*Kim Tong Chol, Ri Kwang Chol*

In 3 axes-stress state, shear fracturing occurs in planes that the value of  $\sigma_s - \mu\sigma_n$  is maximum, as well as in 2 axes-stress state.

In case that  $\Phi$  is close to 0 or 1, shear fractures can be developed in planes that don't contain  $\sigma_2$  axis by various conditions such as inhomogeneity of medium. But in case of  $0 < \Phi < 1$ , only 2 of conjugate shear fractures can be developed.

Key words: shear fracture, stress state