

## 평면이방성 암반에서 선하중에 의한 응력분포 특성

이연규<sup>1)\*</sup>

### Stress Distribution Under Line Load in Transversely Isotropic Rock Mass

Youn-Kyou Lee

**Abstract** Many mechanical defects originated from various geological causes make rock mass exhibit anisotropic characteristics. Understanding how the stress distribution occurs in anisotropic rock mass is, therefore, very important for the design of footings on rock and rock structures. In this study, the patterns of elastic stress distribution, developed by acting line load on the surface, in transversely isotropic was investigated. The influence of joint stiffness, joint spacing, and dip angle on the stress distribution was examined. By assuming the Mohr-Coulomb criterion as joint slip condition, the development of joint slip zone was also discussed.

**KeyWords** transversely isotropic rock mass, rock joint, Mohr-Coulomb criterion, joint slip

**초 록** 암반은 여러 가지 지질학적 요인에 기인한 역학적 결함을 많이 포함하고 있기 때문에 이방성 거동을 보이는 경우가 대부분이다. 그러므로 안전한 암반구조물이나 암반기초의 설계를 위해서는 이방성 암반에서 응력 분포의 특성을 이해하는 것이 매우 중요하다. 이 연구에서는 반무한 평면이방성 지반의 표면에 선하중이 작용할 때 지반에 야기되는 탄성응력 분포의 특성을 고찰하였다. 절리의 강성과 절리의 간격, 경사각이 응력분포 형태에 미치는 영향이 검토되었다. 절리면의 미끄러짐 조건으로 Mohr-Coulomb 식을 가정할 경우, 절리면을 통한 미끄러짐이 발생할 수 있는 영역에 대한 고찰도 수행되었다.

**핵심어** 평면이방성 암반, 암석절리, Mohr-Coloumb 조건식, 절리 미끄러짐

### 1. 서 론

암반의 강도, 탄성정수 등의 이방성은 암반공학에서 특히 중요한 관심 사항이라 할 수 있다. 이방성 거동이 예상되는 암반의 안정성 평가는 해석적 혹은 수치해석적 방법을 활용하여 검토될 수 있다. 수치해석법은 해석적 방법에 의한 이론적 연구에 그 바탕을 두고 있다. 그러므로 이방성 암반에 대한 해석적 연구는 수치해석적 방법의 연구에 못지않게 그 중요성이 크다고 할 수 있다.

규칙적인 혹은 불규칙적인 절리군의 존재로 인해 발생하는 암반 탄성정수의 이방성과 이에 따른 강도 이방성에 대한 대표적인 해석적 연구로는 Fossum(1985)과 Amadei(1988, 1993)를 들 수 있다. Jaeger & Cook (1968)은 최대주응력 방향에 경사진 층리면을 갖는 암석시료의 강도 이방성을 Mohr-Coulomb 파괴조건식을

적용하여 해석하였다. Jaeger & Cook의 연구에서는 단순히 응력상태를 절리면의 방향으로 회전시켜 절리면에 작용하는 수직응력과 전단응력을 구한 후 절리면의 미끄러짐 여부를 판단하였다. Jaeger & Cook의 해석법을 탄소성 해석으로 확장시킨 편재절리모델(ubiquitous joint model)이 암반의 강도 이방성 해석에 활용되는 경우도 있다(Itasca, 1999). 그러나 이러한 강도 이방성 해석법에서는 실제로 이방성 응력상태를 야기하는 연약면들의 역학적 특성들이 고려되지 않았거나, 균질한(uniform) 응력상태를 가정하고 해석한 경우가 대부분이다. Kumar(1997)는 원형터널 주변에서 연약면을 따라 발생하는 미끄러짐 영역을 해석적 방법으로 연구하였으나, 여기에서도 절리면 강성과 절리 간격 등이 고려되지 않았고 공동 주변의 응력집중은 등방성 암반에서나 적용할 수 있는 Kirsch해(Obert & Duvall, 1967)를 가정한 후 응력을 회전시켜 절리면의 미끄러짐 여부를 판단하였다.

본 연구에서는 평면이방성 암반에서 암반의 파괴영역 형태를 고찰하기 위하여 반무한 평면이방성 암반의 표면에 선하중이 작용하는 상황을 설정하고, 하중 작

<sup>1)</sup> 정회원, 군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학전공

\* 교신저자 : kyulee@kunsan.ac.kr

접수일 : 2005년 7월 25일

심사 완료일 : 2005년 8월 16일

용점 부근의 과응력 영역과 연약면을 따르는 미끄러짐 발생 영역을 고찰하였다. 먼저 규칙적인 단일 절리군이 발달한 암반을 절리의 특성이 고려된 등가의 평면이방성(transversely isotropic) 암반으로 표현하였다. 평면이방성 암반의 표면에 선하중이 작용하는 상황에 대한 해석해(Goodman, 1989)를 구한 후 이를 다시 절리면 좌표계로 회전시켜 절리면의 미끄러짐을 판단하였다. 절리면의 경사각, 절리면의 수직 및 전단강성 변화, 절리 간격에 따른 응력분포 영역의 변화와 절리면의 미끄러짐 영역의 변화도 조사되었다.

2. 이 론

2.1 등방탄성 지반의 응력분포

Fig. 1과 같이 반무한 등방탄성 지반의 표면에 수직으로 선하중  $P$ 가 작용하면 선하중 축에 수직인 2차원 단면의 임의 지점  $(r, \theta)$ 에서 응력성분들은 다음과 같이 구해진다(Lekhnitskii, 1963).

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2P \cos \theta}{\pi r} \\ \sigma_\theta &= 0, \quad \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$\sigma_r$ 의 값이 동일한 지점을 연결하면 Fig. 1과 같이 하중 작용점에 접하는 원형의 등응력선이 얻어진다. 즉, 단면내 임의 지점에서는  $\sigma_r$ 이 주응력으로 작용하는 단축응력상태가 됨을 알 수 있다. 따라서  $\sigma_r$ 의 값이 일축 압축강도를 갖는 등응력원을 가정하면 이 원은 지반의 파쇄영역의 경계부에 해당한다고 볼 수 있다.

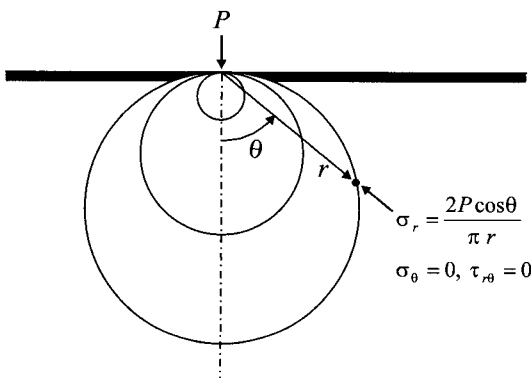


Fig. 1. Contours of radial stress under line load on isotropic medium

2.2 평면이방성 암반내의 응력분포

무결암 암반 내에 규칙적인 간격의 단일 절리군이 존재하는 암반은 등가의 평면이방성 매질로 대체하는 것이 가능하다. Bray는 이러한 등가매질로 이루어진 반무한 평면에 작용하는 선하중에 의해 매질 내부에 발생하는 응력분포를 해석적인 방법으로 계산하였다(Goodman, 1989).

Bray는 Fig. 2와 같이 경사각이  $(90^\circ - \alpha)$ 이고 절리 간격이  $s$ 인 규칙적인 절리군이 발달한 탄성지반에서 주향에 수직인 단면의 응력분포를 계산하였다. 지표면에 선하중  $P$ 가 작용할 때 하중 작용점에서  $r$ 만큼 떨어진 지점에서 탄성응력은 평면변형률 조건에서 다음과 같이 이론적으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{h}{\pi r} \left( \frac{P_x \cos \beta - P_y g \sin \beta}{(\cos^2 \beta - g \sin^2 \beta)^2 + h^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta} \right) \\ \sigma_\theta &= 0, \quad \tau_{r\theta} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $P_x = P \cos \alpha$ 는 절리면에 평행한 선하중 성분이고  $P_y = P \sin \alpha$ 는 절리면에 수직인 선하중 성분이다.  $\beta = \theta - \alpha$ 는 절리면과 응력을 계산하고자 하는 지점을 통과하는 반경선 사이의 각도이다. 무차원 상수  $h$ 와  $g$ 는 절리면의 간격( $s$ ), 절리면의 수직강성( $k_n$ ), 절리면의 전단강성( $k_s$ ), 무결암의 탄성계수( $E$ ), 무결암의 포아송비( $\nu$ )를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$g = \sqrt{1 + \frac{E}{(1-\nu^2)k_n s}} \quad (3)$$

$$h = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{2(1+\nu)}{E} + \frac{1}{k_s s} \right) + \left( g - \frac{\nu}{1-\nu} \right)} \quad (4)$$

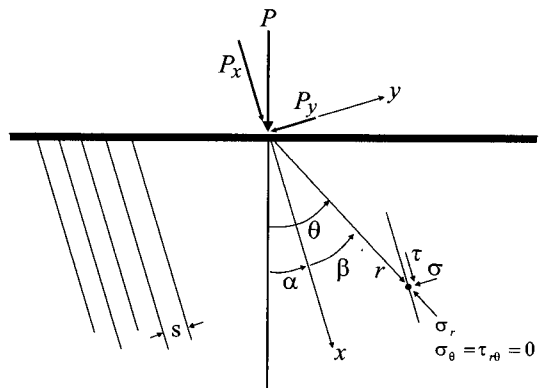


Fig. 2. Stress components in a transversely isotropic rock

평면이방성 지반의 경우도 등방성 매질의 경우와 같이 임의 지점에서 접선응력 성분 ( $\sigma_\theta$ ) 과 전단응력 성분 ( $\tau_{,\theta}$ ) 은 0이 되고 반경방향 응력성분 ( $\sigma_r$ ) 이 주응력으로 작용한다는 것을 식 (2)로부터 알 수 있다. 따라서 이 경우도 반경방향에서는 일축응력상태에 있음을 알 수 있고, 반경방향 응력성분의 크기가 무결암의 일축압축강도를 넘어서는 영역은 과응력 상태에 있다고 간주할 수 있다.

탄성해 식 (2)는 평면이방성 암반에 놓여 있는 기초 하부의 응력분포를 예측하는데 매우 유용하게 이용될 수 있다. 물론 실제 기초는 어느 정도의 하중 작용면적을 가지고 있기 때문에 선하중 조건을 만족시키지 않을 수도 있지만 응력분포 양상은 선하중 조건에서 구한 해석해와 정성적으로 유사할 것으로 예상된다.

**2.3 절리면의 미끄러짐과 무결암의 파괴조건**

평면이방성 암반에서의 파쇄는 무결암 자체의 파쇄 외에도 절리면 혹은 연약면의 미끄러짐에 의해서도 발생할 수 있다. 절리면의 미끄러짐 여부는 이 절리면에 작용하는 응력상태를 구한 후 적절한 미끄러짐 조건식을 적용함으로써 판단할 수 있다. 이 연구에서는 Mohr-Coulomb 조건식을 이용하여 연약면의 미끄러짐 여부를 판단하였다. Fig. 2와 같이 임의 지점에서 반경방향 응력  $\sigma_r$  은 일축상태의 주응력이므로 이로부터 절리면에 작용하는 수직응력 ( $\sigma$ ) 과 전단응력 ( $\tau$ ) 은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma = \frac{\sigma_r}{2} - \frac{\sigma_r}{2} \cos 2\beta \tag{5}$$

$$\tau = \frac{\sigma_r}{2} \sin 2\beta \tag{6}$$

여기서  $\beta = \theta - \alpha$  임을 Fig. 2로부터 알 수 있다.

절리면의 미끄러짐에 대한 Mohr-Coulomb 조건식은 다음과 같다.

$$|\tau| = \sigma \tan \phi_j + c_j \tag{7}$$

여기서  $\phi_j$  는 절리면의 마찰각이고  $c_j$  는 절리면의 점착강도(cohesion)이다.

식 (5)와 식 (6)을 식 (7)에 대입하면 평면이방성 지반에서 절리면의 미끄러짐 조건식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$|\sigma_r \sin 2\beta| = \sigma_r (1 - \cos 2\beta) \tan \phi_j + 2c_j \tag{8}$$

$\sigma_r$  은 식 (2)로 나타낼 수 있으므로 식 (8)은 다음과

같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left| \left( \frac{P_x \cos \beta - P_y g \sin \beta}{(\cos^2 \beta - g \sin^2 \beta)^2 + h^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta} \right) \sin 2\beta \right| \\ &= \left( \frac{P_x \cos \beta - P_y g \sin \beta}{(\cos^2 \beta - g \sin^2 \beta)^2 + h^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta} \right) (1 - \cos 2\beta) \tan \phi_j \\ & \quad + \frac{2\pi r c_j}{h} \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)는 주어진 입력자료에 대해  $r$  과  $\theta$  를 변수로 갖는 음함수이며 이 조건식을 만족하는  $r$  과  $\theta$  를 찾음으로써 절리면을 통한 미끄러짐이 발생하는 영역을 도출할 수 있다.

무결암의 파괴조건 역시 Mohr-Coulomb 식을 가정할 수 있고, 최대주응력 ( $\sigma_1$ ) 과 최소주응력 ( $\sigma_3$ ) 을 이용하여 이를 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \tag{10}$$

여기서  $\phi$  는 무결암의 내부마찰각이고  $c$  는 무결암의 점착강도이다. Fig. 2와 같은 평면이방성 암반의 표면에 선하중이 작용할 경우  $\sigma_r$  이 단축상태의 주응력이므로 임의 지점에서 무결암의 파괴조건식은 다음과 같이 반경방향응력이 암석의 단축압축강도 ( $\sigma_c$ ) 와 같아지는 조건식으로 표현하는 것이 가능하다.

$$\sigma_r = \frac{h}{\pi r} \left( \frac{P_x \cos \beta - P_y g \sin \beta}{(\cos^2 \beta - g \sin^2 \beta)^2 + h^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta} \right) = \sigma_c \tag{11}$$

여기서

$$\sigma_c = 2c \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \tag{12}$$

이다.

한편 인장파괴의 조건은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\sigma_r = \sigma_t \tag{13}$$

인장강도는 식 (10)에서  $\sigma_3 = \sigma_t$ ,  $\sigma_1 = 0$ 으로 놓음으로써 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\sigma_t = -2c \cdot \cot \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \tag{14}$$

반경방향응력 분포와 한계응력조건을 표현하는 식 (2), 식 (9), 식 (11), 식 (13)은  $r$  과  $\theta$  에 대한 비선형 음함수(implicit function) 형태로 표현되어 있다. 따라서 이

러한 함수를 극좌표계에 도식하기 위해서는 수치해석적 근사기법이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 Maple (Maplesoft, 2003) 프로그램 언어를 활용하여 이 식들을 만족하는  $r$ 과  $\theta$ 의 영역을 구하고 이를 도식하여 3절에서의 분석에 활용하고자 한다.

### 3. 응력집중 및 미끄러짐 영역 분석

#### 3.1 선하중에 의한 응력분포 특성

지표면에 선하중이 작용함으로써 반무한 평면이방성 지반에 발생하는 응력분포의 특성을 절리면의 경사각을 변화시키면서 살펴보았다. Fig. 3은  $\alpha$ 가  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 일 때  $\sigma_r = 100$  MPa의 등응력선을 도식한 것이다. 분석에서는 Gaziev & Erlikhman의 모델실험 결과와 비교를 위해 Bray가 가정한 것(Goodman, 1989)과 동일하

게  $g = \sqrt{2}$ ,  $h = 4.45$ 를 가정하였다. 선하중은  $P = 100$  MN/m을 가정하였다.

수직절리군의 경우 응력집중 영역은 하중 작용점 하부로 좁고 깊게 나타나고 있다. 수평절리군의 경우는 수직절리군에 비하여 응력집중 영역이 측면으로 더 넓으나 심도는 깊지 않고 등응력선도의 형태는 대체로 종을 뒤집어 놓은 모양을 보이고 있다. 절리면의 경사가 큰 경우에는 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 원점에서 절리면과 평행한 방향을 따라 응력집중이 크게 발생하고, 절리면에 수직인 방향으로 상대적으로 응력집중 영역이 깊지 않는 것으로 나타난다. 절리면의 경사가 완만한 경우인 Fig. 3(c)에서는 오히려 절리면에 수직인 방향으로 응력집중이 크게 발생하는 경향을 보인다. 이러한 응력분포 형태는 Gaziev & Erlikhman의 모델실험 결과(Fig. 4)와도 일치하는 경향을 나타내고 있음을

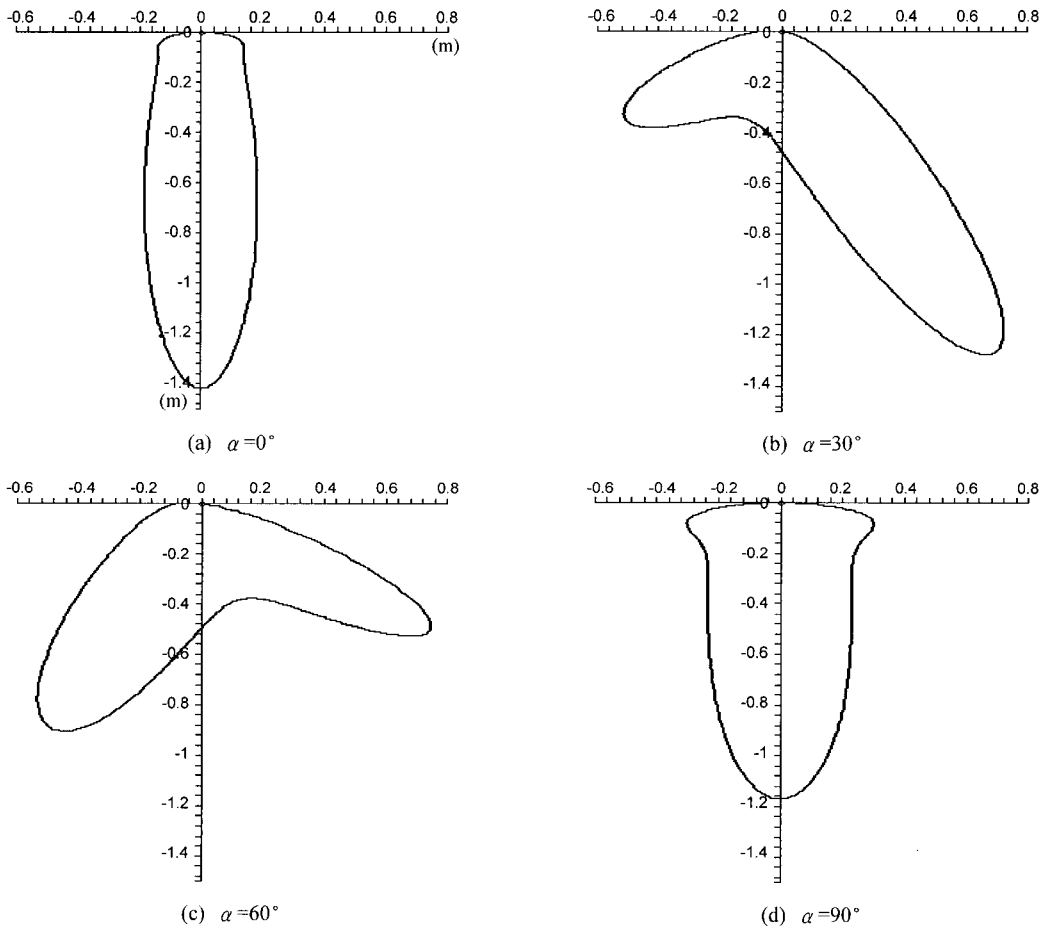


Fig. 3. The patterns of radial stress distribution in transversely isotropic medium ( $\sigma_r = 100$  MPa)

보여준다.

Fig. 5에서는  $\alpha = 30^\circ$ 와  $\alpha = 90^\circ$ 인 두 경우에 대해 절리면의 강성비 ( $k_n/k_s$ )를 1, 2, 5로 변화시켰을 때의 응력분포 변화를 나타내었다. 강성비의 영향에 대한 고

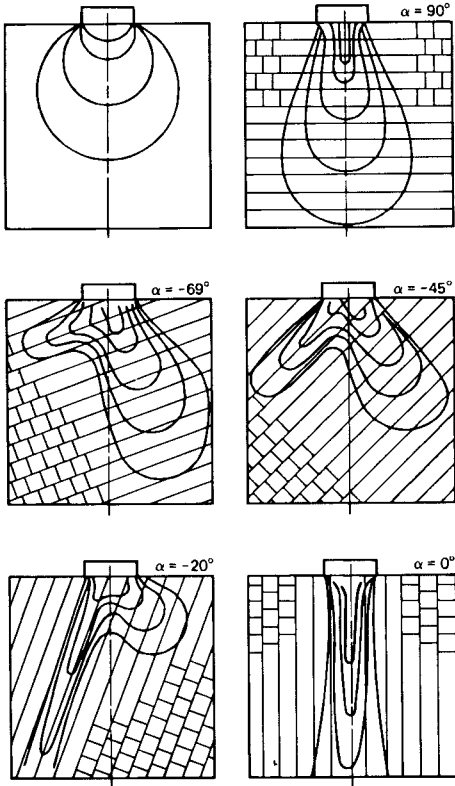


Fig. 4. Lines of equal radial stress determined by Gaziev and Eriikman (Goodman, 1989)

찰은 Wyllic(1992)에 의해서도 수행된 바 있다. 원점에  $P = 100 \text{ MN/m}$ 의 선하중을 작용시켰을 때 100 MPa의 등응력선을 도시하였으며 분석에 이용된 입력자료는 그림에 직접 나타내었다. 강성비가 커짐에 따라 응력분포의 이방성은 더욱 커지는 경향을 볼 수 있다. 경사진 절리군의 경우 강성비가 커질수록 원점으로부터 절리면과 평행한 방향으로 응력집중 영역이 깊게 확장되는 특징을 볼 수 있다. 강성비가 커지는 경우 상대적으로 큰 수직강성 때문에 절리면에 수직인 방향으로의 변위 발생이 적어지고 이에 따라 절리면에 수직인 방향으로 어느 정도 응력집중 범위가 확장되고 있다. 수평절리가 존재하는 경우에는 강성비가 커짐에 따라 타원형태에서 하중 작용점에서 접하는 종모양으로 응력집중 영역 형태가 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 6은  $\alpha = 30^\circ$ 와  $\alpha = 90^\circ$ 인 두 경우에 대해 절리간격을 0.2 m, 0.5 m, 2 m, 10 m로 변화시켰을 때의  $\sigma_r = 100 \text{ MPa}$ 인 등응력선도를 도시한 것이다. 작용시킨 선하중은 Fig. 5와 같이  $P = 100 \text{ MN/m}$ 이며 분석에 이용된 기타 입력자료는 그림에 직접 표시하였다. 절리면의 간격이 커질수록 절리의 영향이 사라져 지반의 이방성이 감소하고 있음을 보여준다. 즉, 등응력선도는 점차 하중 작용점에 접하는 원형에 가까워지고 있다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 등방성지반의 등응력선도는 원형으로 나타난다. 또한 평면이방성 지반에서 응력집중 영역의 형태는 절리면의 간격에 민감하게 의존한다는 것을 Fig. 6로부터 알 수 있다. 따라서 절리면의 간격이 비교적 좁은 이방성 지반에서 응력분포 해석을 실시할 경우에는 평균 절리간격의 선정에 매우 신중을 기해야 한다는 점을 이 해석결과가 말해준다.

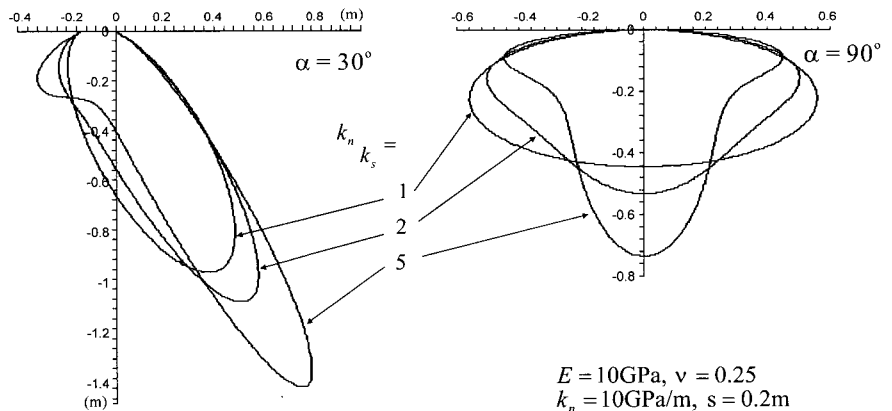


Fig. 5. The effect of joint stiffness ratio on the stress distribution ( $\sigma_r = 100 \text{ MPa}$ )

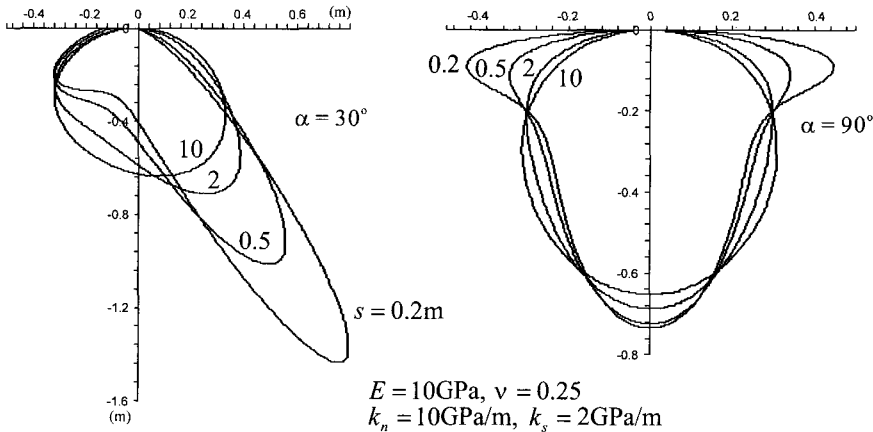


Fig. 6. The effect of joint spacing on the stress distribution ( $\sigma_r = 100 \text{ MPa}$ )

### 3.2 무결암의 파괴 및 미끄러짐 영역 분석

암반의 파괴는 무결암에서 파괴시의 응력조건에 따라 특정방향으로 새로운 균열이 형성되면서 발생되기도 하지만, 기존의 연약면을 따라 파괴가 발생될 수도 있다. 전자의 경우 응력조건에 따라 이론적 파괴면의 방향이 변화되므로 파괴면의 방향을 알 필요가 없는 식 (10)과 같은 형태의 파괴조건식을 적용하여 파괴 여부를 판단하는 것이 편리하다. 기존의 절리면에서 발생할 수 있는 미끄러짐 파괴는 주어진 좌표계에서 표시된 응력성분들을 절리면 좌표계에서의 성분들로 회전시킨 후 절리면에 작용하는 수직응력과 전단응력을 이용하여 판단할 수 있다. 이 경우 식 (7)이나 식 (9)가 편리한 파괴 기준식이 된다. 또한 절리면의 파괴는 절리면에 작용하는 수직응력이 인장강도에 도달할 때 일어나기도 한다.

본 연구에서는 선하중이 작용하는 평면이방성 지반에 대해 2.3절에서 설명한 이론에 따라 무결암의 파괴조건식을 만족시키는 과응력 영역과 절리면의 미끄러짐이 발생하는 영역 그리고 인장강도를 넘어서는 영역을 분석하였다. 해석에 이용한 암석 및 절리의 역학적 성질은 다음과 같다.

- 무결암의 성질 :  
 $E = 10 \text{ GPa}, \nu = 0.25, \phi = 40^\circ, c = 20 \text{ MPa}$
- 절리면의 성질 :  
 $k_n = 10 \text{ GPa/m}, k_s = 2 \text{ GPa/m}, s = 0.3 \text{ m},$   
 $\phi_j = 40^\circ, c_j = 20 \text{ MPa}$

2절에서 설명한 바와 같이 본 연구에서 언급하는 탄성계수와 포아송비는 무결암의 값들을 의미하므로 암반의

경우와는 구별할 필요가 있다. 절리면의 마찰각과 점착력의 값은 무결암의 값과 다르게 설정하는 것이 일반적이지만 이 경우 무결암의 압축파괴가 발생하는 영역과 절리면의 미끄러짐이 발생하는 영역의 면적에 상당한 차이가 있을 수 있으므로 하중 작용점 부근에서의 미끄러짐 영역의 형태를 도시하는데 어려움이 따른다. 따라서 단축압축 파괴조건을 만족시키는 영역과 절리면을 통한 미끄러짐 파괴를 발생시키는 영역의 비교를 쉽게 하기 위하여 이 연구에서는 절리면의 마찰각과 점착강도의 값을 무결암의 값과 동일하게 설정하였다.  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  인 6가지의 경우에 대해 분석을 실시하였다. 선하중의 강도는 앞에서의 분석과 동일하게  $P = 100 \text{ MN/m}$ 를 작용시켰다.

Fig. 7에 해석결과를 도시하였다. 그림에서는 식 (9), 식 (11), 식 (13)을 각각 만족시키는 미끄러짐 영역, 무결암 파괴영역, 인장파괴 영역을 동시에 나타내었다. 이 연구에서는 탄성응력만을 고려하였기 때문에 파괴영역은 과응력 영역의 의미를 가지고 있다. Fig. 7에서 회색 부분은 절리면을 따라 미끄러짐이 발생하는 영역을 나타내며, 회색부분이 포함된 실선으로 둘러싸인 영역은 무결암의 압축 혹은 인장 파괴가 발생하는 영역을 나타낸다.

미끄러짐 영역은 단축압축파괴 영역이나 인장파괴 영역 내부에 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서 도시된 미끄러짐 영역에서는 압축파괴-미끄러짐 혹은 인장파괴-미끄러짐이 동시에 발생할 있는 영역이므로 역학적으로 매우 취약한 영역으로 이해할 수 있다. 이러한 취약 영역은 그림에서 보는 바와 같이 절리군의 경사에 따라 다양한 형태를 나타내게 되므로 암반 기초의 설계나 암반구조물 설계시 절리군의 방향성의 영향을 신중

하게 분석할 필요가 있음을 Fig. 7은 암시하고 있다.

수평절리와 수직절리가 존재하는 경우에는 좌우 대칭 형태의 미끄러짐 영역이 나타나고 있고, 인장강도를 넘어서는 영역은 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 수직 방향 절리군의 경우 미끄러짐 영역은 하중 작용점 하부에서 좁게 깊게 분포하고 수평절리군의 경우는 좌우로 상대적으로 넓게 펼쳐지는 꽃잎 모양의 형태를 보여주고 있다.

경사진 절리군의 경우 경사방향 쪽의 지표 부근에서 인장파괴 영역과 전단파괴영역이 발달되고 있음을 알

수 있다. 절리군의 경사가 급해질수록 인장파괴 영역은 경사방향 쪽으로 확대되지만, 인장파괴 영역 내부에 포함된 전단파괴 영역은 급속히 축소되는 특징을 보여준다. 경사각이  $45^\circ$  이하인 경우에는 경사반대방향의 지표 부근에서도 미끄러짐이 발달되고 있다. 대체로 미끄러짐 영역의 형태는 하중작용점에서 시작하여 꽃잎 형태로 절리면 경사방향과 관련된 특정방향으로 확대되면서 발달되고 있다.

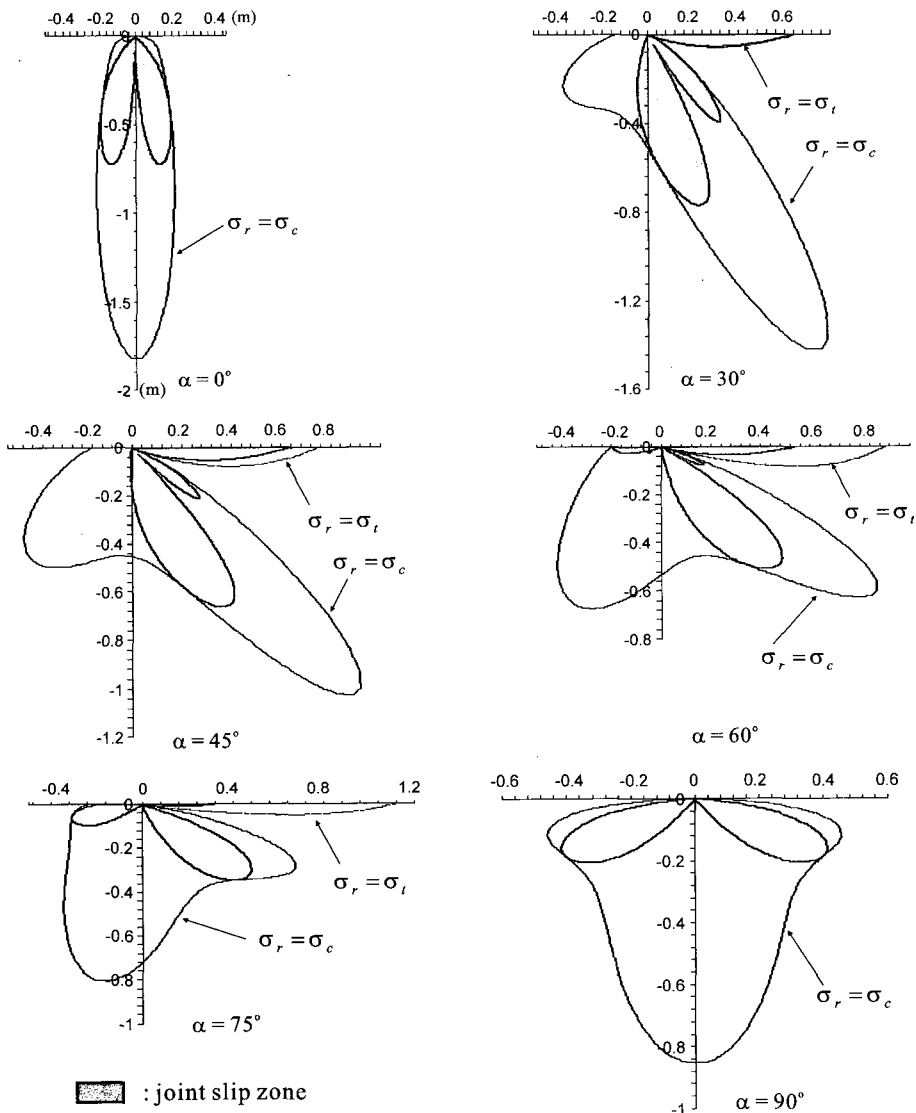


Fig. 7. Zones satisfying joint slip condition, uniaxial failure condition, and tensional failure criteria

## 4. 결 론

규칙적인 단일 절리군을 포함하는 암반을 증가의 평면이방성 암반으로 변환시켜 선하중하에서 반무한 암반에 야기되는 응력집중 및 파괴영역을 살펴본 결과 절리의 방향성, 절리간격, 절리면의 강성 등이 지반에서 파괴영역 발달형태에 결정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이러한 연구 결과는 평면이방성 암반에서의 암반기초설계에 직접적으로 응용이 가능할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 단일 절리군을 갖는 평면이방성 암반을 분석대상으로 하였지만 절리군의 개수가 2개 이상일 경우에는 고려되어야 할 절리군의 방향성에 따라 보다 복잡한 형태의 파괴영역이 예상된다. 따라서 암반기초를 포함한 암반구조물의 해석에 있어서 고려할 절리의 기하학적 및 역학적 성질의 대표값을 선정하는데 매우 세심한 주의가 요망됨을 본 연구결과는 암시하여 주고 있다.

본 연구에서 분석에 이용한 파괴영역의 형태들은 이방성 암반의 안정성 해석을 위한 수치해석 기법의 개발 과정에서 개발할 수치모델의 검증수단으로도 활용 가치가 크다고 사료된다.

## 사 사

이 연구는 군산대학교 해양개발연구소의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드린다.

## 참고문헌

1. Amadei, B., 1988, Strength of a regularly jointed rockmass under biaxial and axisymmetric loading, Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 25.1, 3-14.
2. Amadei, B., 1993, Effect of joints on rock mass strength and deformability, Compressive Rock Engineering, Principles, Practice & Projects, Vol. 1, 331-365.
3. Fossum, A.F., 1985, Effective elastic properties for a randomly jointed rock mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 22, 467-470.
4. Goodman, R.E., 1989, Introduction to rock mechanics (2nd Ed.), John Wiley & Sons.
5. Itasca, 1999, FLAC Theory and background, USA.
6. Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1968, Fundamentals of rock mechanics, Chapman & Hall, London.
7. Kumar, P., 1997, Slip zones around circular openings in a jointed Hoek-Brown Medium, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34.6, 875-883.
8. Lekhnitskii, S.G., 1963, Theory of elasticity of an anisotropic elastic body, Holden-Day, Inc.
9. Maplesoft, 2003, Maple 9 - Advanced programing guide, Waterloo Maple Inc.
10. Obert, L. and Duvall, W.I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, Inc.
11. Wyllie, D.C., 1992, Foundations on rock, Chapman & Hall.

### 이 연 규

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사

Tel: 063-469-1864

E-mail: kyoullee@kunsan.ac.kr

현재 군산대학교 해양과학대학 해양응용  
공학부 부교수

