

## 화강편마암의 강도특성 실험 및 파괴메카니즘에 관한 연구

최안식<sup>1)</sup> · 조만섭<sup>2)</sup> · 김영석<sup>3)</sup>

### A study on the Fracture Mechanism and the Test for Strength Properties of the Granite-Gneiss

An-Sik Choi, Mahn-Sup Cho and Young-Seok Kim

**ABSTRACT** When tunnels or underground structures are constructed in anisotropic rock mass, designers and constructors have to consider the anisotropic characteristics in rock mass because their physical and mechanical properties are depended on the anisotropic angles( $\beta$ ). In this study, therefore, we have first investigated the mechanical behavior of the gneiss specimen from lab. tests, and then have analyzed the behavior of specimens for to the transversely isotropic model in elastic medium using the FLAC program. The results of this study were summarized as follows; 1) In the result of the variation tests, in general, the properties of strength were depended on the angle of inclination in spite of the hard rock. And except for the shear strength test, the lowest and peak stress were appeared at  $60^\circ$  and  $90^\circ$  respectively. 2) The results of specimen modeling analysis using FDM well indicated the mechanical behaviors of the specimen of transversely isotropic model.

**Key words** : Anisotropy, Transversely isotropic model, Fracture Mechanism

**초 록** : 이방성 암반의 역학적 거동은 해당 암반의 이방성 각도에 따라 다양한 거동을 하게 되므로 터널이나 지하구조물들이 이방성 암반 내에 위치하는 경우, 이러한 특성을 고려한 설계 및 시공이 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 먼저, 실내시험을 통하여 편마구조에 대한 역학적 특성을 규명하고 실내시험으로부터 구한 강도특성들을 이용하여 시험편 모델에 대한 유한차분해석을 수행하였으며, 시험편의 파괴메카니즘에 대한 수치해석적 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면, 1) 비교적 경암에 속하는 화강편마암임에도 불구하고, 퇴적층이나 불연속면을 가진 이방성 모델의 시험결과와 동일하게 편마구조의 각도변화에 따라 파괴강도의 경향을 뚜렷하게 구분할 수 있었으며, 전단강도시험을 제외하고 일반적으로  $\beta = 60^\circ$ 에서 가장 적은 강도치를 나타내었다. 2) 횡등방성 모델을 이용하여 시험편에 대한 유한차분해석을 수행한 결과, 편마구조의 각도에 따라 응력분포 및 변형특성이 변화함을 알 수 있었다.

**핵심어** : 이방성, 면내등방성 모델, 파괴메카니즘

## 1. 서 론

편마구조는 엽리를 가진 변성암의 입자가 클 때 그 암석에 나타난 평행구조를 말하는데, 일반적으로 이러한 층리 및 엽리, 편리, 편마구조 등의 광물학적 구조특성을 지닌 암반을 극이방성(polar anisotropy) 혹은 직교이방성(orthogonal anisotropy), 횡등방성(transversely isotropy) 암반이라 불리운다. 이와 같은 횡등방성과는 다소 차이가 있지만 비슷한 거동을 보이는 인공 불연속면에 대한 연구는 김기주(1986), 김영근(1993), 김영수 외(1998) 등 이미 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 이러한 일련의 실험들은 대부분이 암석시험편을 대상으로 인공적인 불연속면을 만들어 그들의 거동에 관한 연구를 하였다.

반면 편마암, 셰일, 사암, 편암 및 혈암 등의 편리와 층리의 방향에 대한 암석의 역학적 거동에 대한 실험적 연구는 Deklotz 외(1966), McCabe 외(1975) 등에 의해 발표되었고, 이들 시험결과에 있어서 공통점은 연약면이 하중방향에 대해  $30^\circ$  경사진 상태에서 최소강도를 보인다고 보고하였다. 그러나 이와 같은 자연상태의 이방성 암석에 대한 강도특성 이외의 이론해를 구하는 방정식을 Amadei B., Lekhnitskii S. G.(Walter Wittke, 1990) 등

1)정회원, (주)신아지오컨설팅트 사원  
2)정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원  
3)정회원, 전북대학교 공과대학 자원공학과 교수  
원고 접수일 : 1999년 10월 25일  
원고 심사완료일 : 2000년 2월 16일

이 제안한 바 있으나 파괴메카니즘에 대한 규명을 위하여 해석모델을 이용한 사례가 드물고 또한 많은 연구자들이 터널이나 지하구조물의 설계 시 암석의 이방성에 의한 터널 변형거동 연구의 필요성을 제안하여 왔으나 여러 가지 제약조건에 의해 이에 관한 연구가 이루어지지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 이방성이 뚜렷하지만, 편리 또는 엽리, 층리를 가지는 암석보다는 최대 파괴강도가 큰 화강편마암의 역학적 특성을 규명하고, 본 연구의 최종 목표인 파괴메카니즘을 유한차분해석을 통하여 규명하고자 하였다. 유한차분해석 입력변수 값의 산출을 위하여 먼저, 편마구조의 7단계 각도변화에 따른 실내시험을 수행하였으며, 또한 FLAC 프로그램을 사용하여 횡등방성 모델의 방향( $\beta$ ) 변화에 따른 시험편 모델의 수치해석을 통하여 이방성 매질에 대한 파괴메카니즘을 규명하였다.

## 2. 이론적 고찰

횡등방성 모델은 직교이방성체의 특별한 경우로서, 하나의 회전대칭축( $y$ )에 수직한 면에서 매질의 물성이 같은 경우로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 등방성면들이  $x$ - $z$  평면 위에 놓이게 된다.

이와 같이  $x$ - $z$  평면 내에 등방성평면이 교대로 놓여 있다는 가정 하에서 횡등방성 매체를 해석하기 위해서는  $x, y, z$  방향에 대한 (1)식과 같은 역학적 관계가 필요하다.

$$E_3 = E_1 = E_x = E_z, E_2 = E_y$$

$$v_{13} = v_{31} \text{ (or } v_{zx} = v_{xz}), v_{23} = v_{21} \text{ (or } v_{xy} = v_{yx})$$

$$G_{23} = G_{12} \text{ (or } G_{yz} = G_{xy}), G_{13} = \frac{E_1}{2(1+v_{31})}$$

$$\left( \text{or } G_{xz} = \frac{E_x}{2(1+v_{zx})} \right)$$

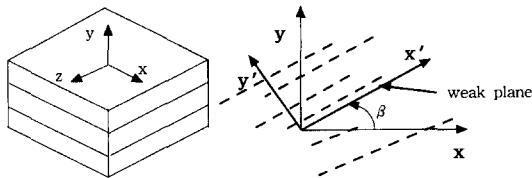


Fig. 1. Planes of elastic anisotropy oriented at an angle  $\beta$  from the  $x$ -axis and transverse isotropy coordinate axes convention ( $x$ - $z$  direction is an isotropy plane)

$$v_{12} = v_{21} \frac{E_1}{E_2} \left( \text{or } v_{xy} = v_{yx} \frac{E_x}{E_y} \right) \quad (1)$$

여기서,

$E_1$  (또는  $E_x$ ) 등방성 평면내 탄성계수

$E_2$  (또는  $E_y$ ) 등방성 평면과 수직한 방향에 대한 탄성계수

$G_{12}$  (또는  $G_{xy}$ ) 등방성 평면과 수직한 면 ( $x$ - $y$  혹은  $z$ - $y$ ) 사이의 교차 전단계수

$G_{13}$  (또는  $G_{xz}$ ) 등방성 평면내 전단탄성계수

$v_{21}$  (또는  $v_{yx}$ )  $y$ -방향의 일축응력에 기인된  $y$ -방향과 수직한 면에서의 수직 변형율과  $x$ -방향으로 발생한 수직변형율에 관한 포아송비

위의 방향에 따른 각각의 특성치들을 이용하여, Amadei 는 탄성 물성치들의 한계를 (2)식과 같이 제시하였고, Lekhnitskii는 직교이방성 탄성매질의 응력-변형률 방정식을 (3)식과 같이 제안하였다(FLAC manual, 1995).

$$E_x > 0, E_y > 0, G_{xy} > 0, v_{xy}^2 < 1, v_{xz}^2 < 1,$$

$$(1-v_{xz}) - \frac{2E_x v_{xz}^2}{E_y} > 0 \quad (2)$$

$$\Delta e_{11} = S_{11} \Delta \sigma_{11} + S_{12} \Delta \sigma_{22} + S_{13} \Delta \sigma_{33} + S_{16} \Delta \sigma_{12}$$

$$\Delta e_{22} = S_{12} \Delta \sigma_{11} + S_{22} \Delta \sigma_{22} + S_{23} \Delta \sigma_{33} + S_{26} \Delta \sigma_{12}$$

$$\Delta e_{33} = S_{13} \Delta \sigma_{11} + S_{23} \Delta \sigma_{22} + S_{33} \Delta \sigma_{33} + S_{36} \Delta \sigma_{12}$$

$$\Delta e_{23} = 1/2 [(S_{44} \Delta \sigma_{23}) + (S_{45} \Delta \sigma_{13})]$$

$$\Delta e_{13} = 1/2 [(S_{45} \Delta \sigma_{23}) + (S_{55} \Delta \sigma_{13})]$$

$$\Delta e_{12} = 1/2 [(S_{16} \Delta \sigma_{11}) + (S_{26} \Delta \sigma_{22}) + (S_{36} \Delta \sigma_{33}) + (S_{66} \Delta \sigma_{12})] \quad (3)$$

$x$ - $y$  평면에서의 평면응력은 다음 (4)식의 관계에 의해 구해지는데, (4)식에 의해 (3)식은 (5)식과 같이 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \sigma_{33} = \Delta \sigma_{13} = \Delta \sigma_{23} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta e_{11} \\ \Delta e_{22} \\ 2\Delta e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \sigma_{11} \\ \Delta \sigma_{22} \\ \Delta \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 3. 시험편 제작 및 실내시험 결과

### 3.1 시험편 제작

Table 1. The physical properties of the rock specimens

Specific Size (D×L)	Specific Gravity	Water contents (%)	Porosity (%)
39 mm×78 mm	2.68	0.30	0.82

본 실험에서 사용된 암석시료는 전북 전주시 덕진구 소재의 “대학로 공사” 현장에서 채취한 화강편마암으로 지표에서 약 -10m 정도에서 채취하였으며, 비교적 지표면에 인접한 상태지만 지질해머로 타격하여도 잘 부서지지 않을 정도의 신선한 암석으로 본 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

시험편 제작은 화강편마암 시료를 Fig. 2와 같이 수평면 대하여 편마구조의 방향이  $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  (단, 직접전단시험의 경우  $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 임)가 되도록 코어를 채취하였으며, 각 시험편의 용도에 따라 직경 39~78 mm, 길이 78~108±1 mm로 제작하였다. 그리고 압열인장시험용 시험편은 직경 39 mm, 길이 19.5 mm로 각각 편마구조의 각도에 따라 제작했으며, 각 시험편은 단면의 편평도가 ±0.05 mm 이내가 되도록 다이아몬드 연마기를 사용하여 성형하였다.

3.2 실험 조건

편마구조를 가지는 횡등방성 시료에 대한 각도별 강도 특성을 규명하기 위하여 일축압축시험, 압열인장시험, 직접전단시험 및 삼축압축시험을 수행하였다.

일축압축시험편의 축방향 및 횡방향 변형율을 측정하

기 위하여 원주형 시험편의 중앙에 스트레인게이지를 부착하였고,  $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  및  $75^\circ$ 의 경우 편마구조의 하향 경사방향에 그리고  $90^\circ$ 의 경우 주향방향에 나란하게 부착하였다(Fig. 2 참조).

직접전단시험에서의 수직응력은 각각 6, 9, 15 MPa의 3단계로 변화시켰으며, 삼축압축시험에서의 봉압은 각각 3, 6, 9 MPa의 3단계로 변화시켜 시험을 실시하였다.

3.3 실내시험 결과 종합

3.3.1 편마구조의 각도변화에 따른 최대파괴강도 특성

편마구조의 각도변화에 따른 일축압축 최대파괴강도는 Table 2에서 볼 수 있는데, 김영수(1998), Deklotz(1966), McCabe(1975) 등에 의해 이미 발표된 바와 같이 편마구조 및 층리면의 각도가 하중방향에 대해  $30^\circ$  즉, Fig. 2의  $\beta = 60^\circ$ 인 경우에서 가장 낮은 최대파괴강도의 경향을 보이고 있어 기존의 연구결과와 일치하고 있음을 알

Table 2. The mechanical properties of the rock specimens on angle

angle( $\beta^\circ$ )	0	30	45	60	75	90
max. fracture strength (MPa)	204.6	156.1	144.5	120.3	157.0	233.8
tensile strength (MPa)	15.9	14.2	13.8	13.5	13.3	13.9
elastic modulus ( $\times 10^4$ MPa)	56.0	45.0	42.0	37.4	62.7	65.6
Poisson's ratio	0.27	0.24	0.14	0.14	0.24	0.28
P-wave velocity (m/sec)	4,856	4,220	3,424	3,678	4,335	4,646

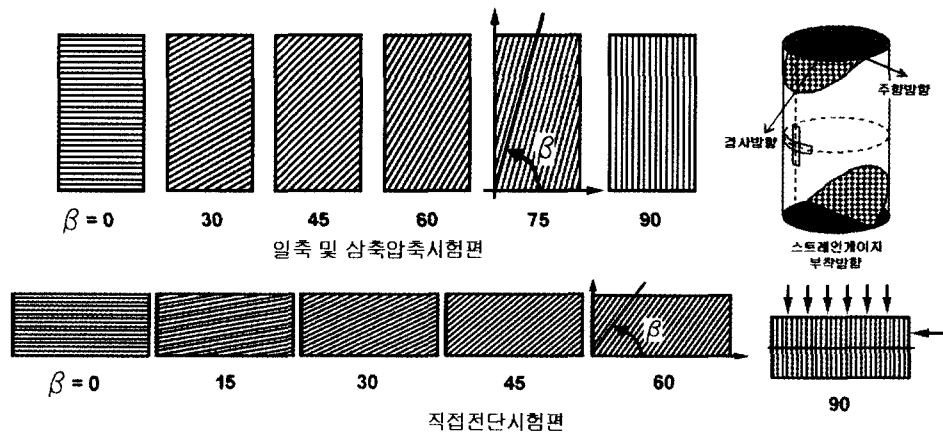
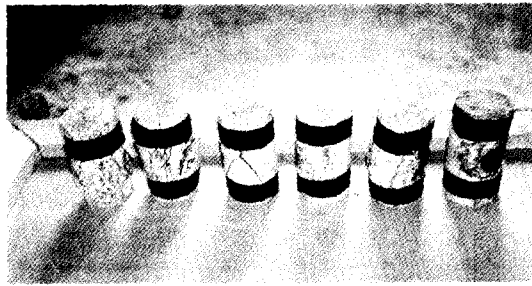


Fig. 2. Angles of weak planes used on tests



left  $\beta = 90^\circ \rightarrow$  right  $\beta = 0^\circ$

Photo. 1. Fracture types of the specimens under the uniaxial compression test

수 있다. 참고로 P와 속도는 시험편의 축방향에 대하여 측정할 값으로 각도변화에 따라 상이한 측정치를 보이고 있다.

Photo. 1은 편마암 시험편에 대한 일축압축시험 종료 후의 파괴형상으로,  $\beta = 90^\circ$ 와  $75^\circ$ 일 때는 편마구조의 영향에 기인하여 시험편 중앙에서 집중적으로 미소한 압편이 형성되며 파괴되었다. 그리고  $\beta = 30^\circ, 45^\circ$  및  $60^\circ$ 의 경우, 규칙성은 다소 미흡하지만 편마구조의 각도와 수직 혹은 수직에 근접하는 큰 파단면을 형성하며, 쉘기 형태의 파괴를 보이고 있다. 또한  $\beta = 0^\circ$ 일 때는 강한 파괴음과 함께 시험편의 중앙부위 표면에서 박편형태의 암석 조각이 떨어져 나가며, 큰 파단면이 형성되는 파괴 형태를 나타내었다.

3.3.2 편마구조의 각도변화에 따른 전단응력 특성

전단방향에 대하여 Fig. 2에서와 같이 편마구조의 방향을 6단계로 변화시키고, 수직응력을 각각 6, 9, 15 MPa로 증가시켜 전단시험을 수행한 결과, Fig. 3에 나타난 바와 같이 전단응력은  $\beta = 90^\circ$ 에서 최대치를 나타내

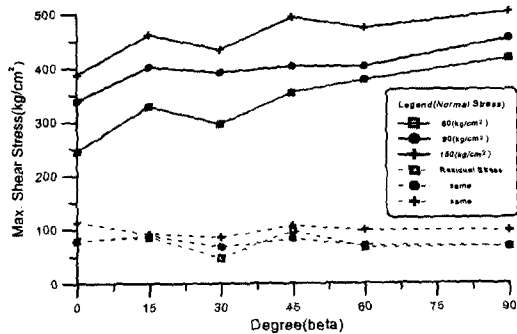


Fig. 3. Relationship between max. shear stress and angle at various confining pressure

었고  $\beta = 0^\circ$ 에서 최소치를 보이고 있다. 즉, 편마구조 영향에 의해 혹은도 층에서의 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 추측되며, 파단면의 형상에서도  $\beta = 90^\circ, 60^\circ$  및  $45^\circ$ 의 시험편은 상당히 거칠고 부분적으로 요철이 심하게 발생한 반면에  $\beta = 0^\circ, 15^\circ$  및  $30^\circ$ 의 시험편은 상대적으로 매끄러운 파단면을 형성하고 있었다.

그리고  $\beta = 0^\circ$ 일 때를 제외한다면  $\beta = 30^\circ$  부근에서 전단응력이 가장 낮게 나타났는데, 김기주(1986)는 전단 하중 하에서 불연속면이나 편마구조의 방향이 시험편 내에 분포하는 인장응력 방향에 대해서 직교하는 경우에 일반적으로 파괴가 쉽게 발생하게 되며, (6)식의  $\tau, \sigma_n$ 에 의한 주응력 방향  $\theta$ 를 구하는 식으로부터 이론적으로 가장 파괴가 쉬운 방향을 계산할 수 있음을 보고하였다.

$$\theta_c = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau}{\sigma_n} \tag{6}$$

따라서 직접전단시험으로부터 구한 각도별 전단응력과 3단계의 수직응력을 (6)식에 각각 대입하여 검증한 결과, 주응력 방향( $\theta$ )이 약  $30^\circ \sim 40^\circ$ 의 범위로 나타나므로  $\beta = 0^\circ$ 를 제외한  $30^\circ$  부근에서 전단응력이 낮게 나타난 Fig. 3의 원인을 추정할 수 있었다.

3.3.3 편마구조의 각도변화에 따른 삼축압축강도 특성

정수압이 작용하는 상태(지하 심부로 가정)에서 편마구조에 의한 강도특성 경향을 파악하기 위하여 편마구조의 각도변화에 따른 삼축압축강도시험을 수행한 결과, Fig. 4에 나타난 바와 같이 편마구조의 방향이  $\beta = 60^\circ$ 일 때 가장 낮은 파괴강도를 보이고 있으며 일반적으로 오목한 어깨형 곡선을 나타내고 있다.

또한 시험편 내에 존재하고 있는 편마구조의 방향( $\beta$ )

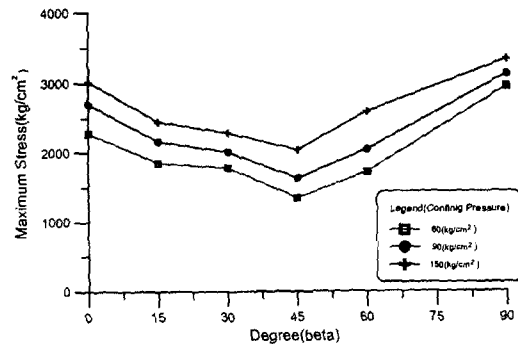


Fig. 4. Relationship between max. stress and angle at various confining pressure

변화에 따라 현저한 강도 차이를 나타내고 있어 비교적 경암에 속하는 암석일지라도 편마구조나 층리, 편리 등이 존재할 경우 이방성의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 특히 이러한 층상압반이 지표부근에서 풍화가 진행된 경우에는 이방성의 영향이 더욱 클 것으로 추측되므로 지하구조물의 설계 및 시공 시에 면밀하게 고려해야 할 필요가 있다.

4. 시험편의 횡등방성 모델링에 의한 파괴 메카니즘 분석

본 장에서는 편마암 시험편을 이용한 상기의 시험결과로부터 파괴메카니즘을 규명하기 위하여 수치해석을 수행하였고, 현재 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 지반전용 해석 프로그램인 FLAC(ver3.03)으로 편마구조 시험편을 모델링하여 수치해석을 수행하였다.

본 해석에 사용된 모델은 횡등방성 및 탄성매질로서 2차원 평면응력 상태에 있는 것으로 가정하였다.

4.1 해석모델 및 경계조건

본 해석에 사용된 모델의 규격은 Fig. 5와 같이 본 연구의 일축압축시험에 사용한 시험편과 동일하게 길이(h)와 폭(w)의 비를 2 : 1로 모델링하였으며, 모델의 입력물성치는 Table 3과 같이 실험을 통해 구한 5개 각도의 값들을 적용하였다. 그리고 Table 4에는 암석 시험편에 대한 각 방향 탄성계수와 포아송비, 전단탄성계수를 나타내었는데, 편마구조의 xz-축의 포아송비를 추정하기

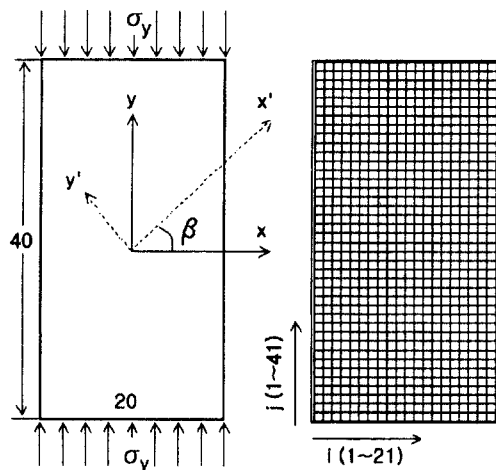


Fig. 5. Feature of the specimen model

Table 3. Elastic modulus of the Jeon-Ju granitic gniess

$\beta$	$E_x$ (MPa)	$E_y$ (MPa)	$E_x/E_y$	$\nu_{yx}$	$\nu_{xy}$	$G_{xy}$ (MPa)
0°	$15.4 \times 10^4$	$54.9 \times 10^3$	2.8	0.268	0.28	$29.0 \times 10^3$
30°	$13.8 \times 10^4$	$44.1 \times 10^3$	3.1	0.24	0.28	$24.5 \times 10^3$
45°	$12.7 \times 10^4$	$41.2 \times 10^3$	3.0	0.141	0.28	$25.6 \times 10^3$
60°	$12.6 \times 10^4$	$36.7 \times 10^3$	3.4	0.138	0.28	$23.4 \times 10^3$
90°	$15.4 \times 10^4$	$64.0 \times 10^3$	2.4	0.28	0.28	$32.4 \times 10^3$

$E_x$ : elastic modulus of lateral direction  
 $E_y$ : elastic modulus of axial direction  
 $G_{xy}$ :  $G_{xy} = (E_x E_y) / (E_x (1 + 2\nu_{xy}) + E_y)$   
 (suggested by S.G. Lekhnitskii)

Table 4. Elastic modulus of Anisotropic Rocks(Batugin & Nirenburg, 1972)

Rock	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$E_x/E_y$	$\nu_{yx}$	$\nu_{xy}$	$G_{xy}$ (GPa)
Siltstone	43.0	40.0	1.075	0.28	0.17	17.0
Sandstone	15.7	9.6	1.635	0.28	0.21	5.2
Limestone	39.8	36.0	1.105	0.18	0.25	14.5
Gray granite	66.8	49.5	1.350	0.17	0.21	25.3
Marble	68.6	50.2	1.367	0.06	0.22	26.6
Sandy shale	10.7	5.2	2.058	0.20	0.41	1.2

위하여 Table 4의 Batugin 과 Nirenburg(1972)가 제시한 연구결과 및 90°일 때의  $\nu_{yx}$ 를 참고하였고, 0.28을 대표값으로 가정하였다.

본 해석의 구속조건은 실제 시험한 상태와 동일하게 하기 위해 상·하 가압판과 접촉하는 부분에서만 x-방향 변위를 고정하였으며, 또한 상재압(P)은 편마구조의  $\beta$  값 변화에 따른 모델의 파괴메카니즘을 보다 명확하게 표현하기 위해서 실내시험으로부터 구한 최대파괴강도 값(250 MPa)보다 큰 300 MPa로 가압하였다.

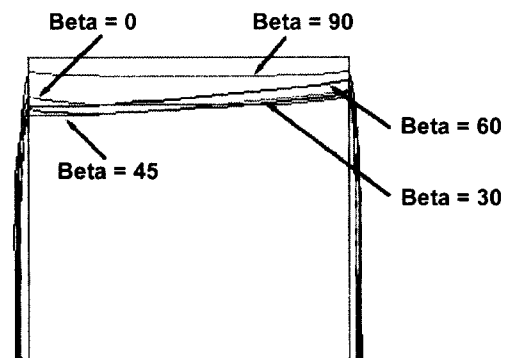


Fig. 6. Deformed specimen for  $\beta = 0^\circ \sim 90^\circ$

## 4.2 해석결과 및 고찰

### 4.2.1 편마구조의 방향에 따른 변형 특성

본 연구에서는 직교이방성 매질을 탄성 횡등방성으로 가정하여 방향의 변화에 따라 수치해석을 수행하였고, 대상 모델의  $\beta$  각도 변화에 따른 변형 및 변위특성을 아래와 같이 고찰하여 보았다. Fig. 6은 5가지 모델의 변형형태를 하나의 그림으로 표현한 것으로서,  $\beta = 0^\circ$ 와  $\beta = 90^\circ$ 는 좌측과 우측이 대칭적으로 변형이 발생하였고  $\beta = 90^\circ$ 에 비해  $\beta = 0^\circ$ 의 y-축 변형이 크게 나타났다. 이러한 경향은 실제 실내시험의 결과인 Table 3의 탄성계수비( $E_x/E_y$ )에서 확인할 수 있었다. 또한  $\beta = 0^\circ$ 와  $90^\circ$  사이의 예각들( $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ )에서는 면내등방성 모델의 특성을 명확하게 보여주고 있는데, Fig. 6에 나타난 바와 같이 일반적으로 x-축을 기준으로 직교이방성의 하향 경사부분이 모델의 좌측부분이기 때문에 우측에 비하여 더 큰 변형을 나타내고 있다.

### 4.2.2 편마구조의 방향에 따른 변위 특성

Fig. 7은 시험편에 분포하는 변위를 벡터로 나타낸 그림으로서, 접측면에서부터 수직으로 나타나다가 중앙부로 갈수록 수평방향으로 변화하고 있다. 또한 각도( $\beta$ )에 따라 벡터방향이 변화하는 위치가  $30^\circ \sim 60^\circ$ 으로 변화함에 따라  $j = 18$ 에서  $j = 14$  까지 변화하고 있어 직교이방성 모델의 방향에 따른 변위특성을 잘 나타내고 있다.

Fig. 8(a)는 시험편 상단 중앙부( $j = 30$ )에서의 y-방향 변위를 나타낸 그림으로 x-축은 시험편의 폭( $i = 1 \sim 21$ ) 그리고 y-축은 y-방향 변위를 나타낸 것이다. 그래프의 기울기는  $30^\circ$ 에서 가장 완만하게 나타나고 있으며, 이것은 좌측과 우측의 변위차가  $45^\circ$ 와  $60^\circ$ 에 비해 상대적으로 작게 나타난다는 것을 의미한다. Fig. 8(a)로부터 각각의 방향에 대한 수직변위 경향을 “x-축 계(class)”와 “y-축 계(class)”로 구분하여 보았는데, 시험편의 길이와 폭의 비가 2:1인 관계로  $45^\circ$ 와  $60^\circ$ 는 y-축에 접근하는

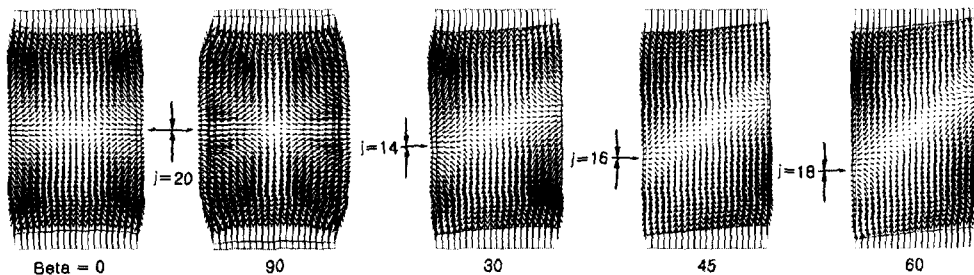


Fig. 7. The displacement vectors at max. load 300 MPa

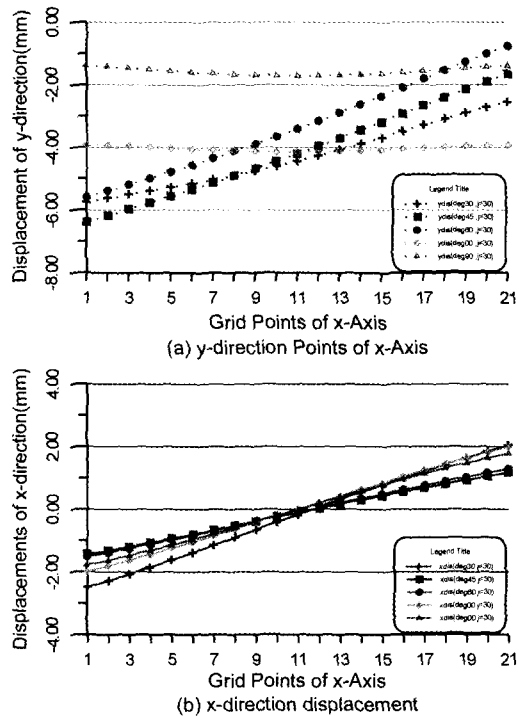


Fig. 8. The vector and amount of x, y-direction displacement at  $j = 30$

“y-축 계”에 속한다고 말할 수 있다. Fig. 8(b)는  $j = 30$ 에서의 x-방향 변위를 그래프로 나타낸 그림으로, 전체적인 경향은 중심부( $i = 11$ ) 지점을 축으로 좌·우의 수평 변위가 비대칭적이며, 좌측의 수평변위가 우측의 수평변위보다 크게 나타나고 있다. 이와 같이 Fig. 8의 변위분포 경향으로부터, 이방성 압반내 지하구조물에 대한 역학적 거동을 규명하기 위하여 탄성 횡등방성 모델을 적용하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

### 4.2.3 편마구조의 방향에 따른 최대주응력 분포 특성

횡등방성 모델에 작용하는 응력분포를 알아보기 위해

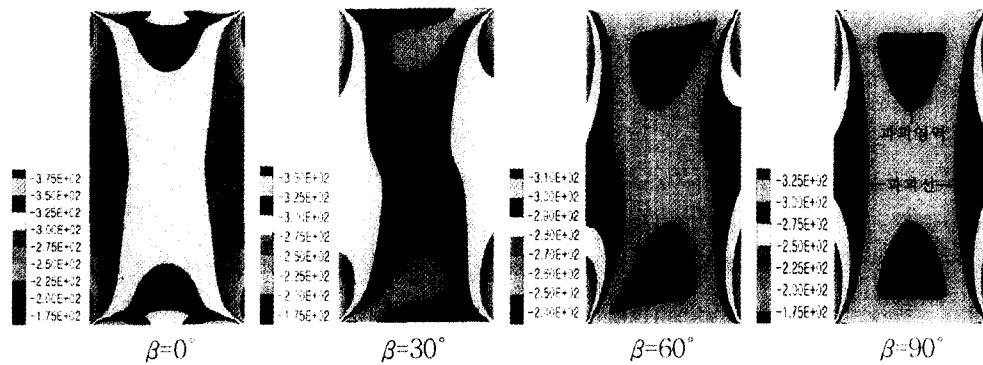


Fig. 9. A plot of major principal stress magnitude contours

최대주응력의 분포를 Fig. 9에 등고선으로 나타내었고, 그림에서 보는 바와 같이 0°와 90°는 가압면에 수직으로 대칭을 이루면서 최대주응력이 분포하고 있으며, 30°와 60°는 편마구조의 방향변화에 따라 상부 가압면의 우측과 하부 가압면의 좌측에 응력집중현상이 나타나고 있다. 또한 방향변화에 따라 파괴영역과 파괴선의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 비교적 경암에 속하는 전주 화강편마암의 횡등방성 특성을 규명하기 위하여 편마구조의 방향변화를 0°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° 인 6단계로 변화시키고 4종류의 실내시험 및 시험편 모델을 통한 수치해석을 수행하였으며, 시험편의 강도특성, 변위특성 및 응력분포특성을 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 하중방향에 대하여 편마구조가 수직인 방향( $\beta = 90^\circ$ )에서 최대파괴강도를 나타내었고,  $\beta = 60^\circ$ (직접전단시험의 경우,  $\beta = 30^\circ$ )에서 가장 낮은 강도치를 나타내었다.
- 2) 횡등방성 모델에 대한 유한차분해석 결과, 편마구조의 방향변화에 따라 변형 및 변위특성이 명확하게 차이를 나타내었으며, 특히 시험편의 폭 : 길이 비가 1 : 2 인 경우에 있어서, 0°~30° 사이의 각도는 x-축 계에 속하고, 45°~90° 사이의 각도에서는 y-축 계에 속함을 알 수 있었다.
- 3) 이상과 같은 연구결과로부터 불연속면 암반 이외에도 편마구조나 편리, 층리 등의 이방성 암반을 대상으로 지하구조물을 설계·시공할 경우에는 횡등방성의 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다. 또한 실제 층상구조로 형

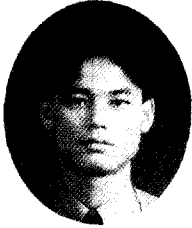
성된 지반에서 시공되는 지하철 터널을 대상으로 계층자료와 수치해석 결과를 상호 비교하는 연구가 지속적으로 수행되고 있으며, 이외에도 3차원 계층을 수행하여 횡단면 및 종단면에 대한 횡등방성 거동 특성을 명확하게 규명해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김기주, 1986, 불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구, 공학박사학위 논문, 서울대학교대학원.
2. 김영근, 1993, 절리특성이 인공절리를 포함한 불연속암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교대학원.
3. 김영수, 허노영, 서인식, 1998, 퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구(대구지역), 한국지반공학회지, 14, 4, 5-15.
4. 최상준, 1996, 평면변형을 해석을 통한 이방성 암반의 거동분석, 공학석사학위논문, 연세대학교대학원.
5. 최안식, 1999, 편마암의 강도 및 변형거동에 관한 연구, 공학석사학위논문, 전북대학교대학원.
7. Amadei, B., 1982, The influence of rock-anisotropy on measurement of stresses in-situ, ph.d. thesis, university of california, berkeley, january.
8. Batugin, S.A., And R.K. Nirenburg, 1972, Approximate relation between the elastic constants of anisotropic rocks and the anisotropy parameters, *Soviet Mining Science*, 8(1), 5-9.
9. Deklotz, E.J., Brown, J.W. and Stemler, O.A., 1966, Anisotropy of a schistose gneiss. Proc. 1st congr. rock mech., lisbon, 1, 465-470.
10. FLAC manual, 1995, ver. 3.03, Vol. I, Itasca, 5-118.
11. FLAC manual, 1995, ver. 3.03, Vol. II, Itasca, D-5~D-10.
12. Lekhnitskii, S.G., 1981, Theory of elasticity of an anisotropic body, moscow: mir publishers.
13. McCabe, W.M. and Koerner, R.M., 1975, High pressure shear strength of an anisotropic mica schist rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12,

219-228.  
14. Walter Wittke, 1990, Rock Mechanics - Theory and

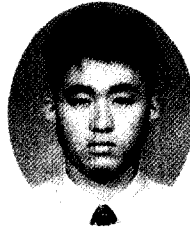
applications with case histories, Springer-Verlag, 43-63.



**최 안 식**

1997년 전북대학교 공과대학 자원  
공학과, 공학사  
1999년 전북대학교 공과대학 자원  
공학과, 공학석사

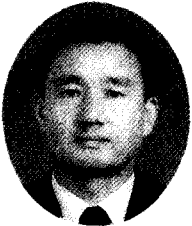
Tel : 02-579-9204  
E-mail : aschoi33@yahoo.com  
현 재 (주)세경엔지니어링 토질부 주임



**조 만 섭**

1991년 전북대학교 공과대학 자원  
공학과, 공학사  
1993년 전북대학교 공과대학 자원  
공학과, 공학석사  
1996년 전북대학교 공과대학 자원  
공학과, 박사과정 수료

Tel : 0344-910-0522  
E-mail : mscho@kict.re.kr  
현 재 한국건설기술연구원 토목연구부 지하구조물  
연구그룹, 연구원



**김 영 석**

1965년 전북대학교 공과대학 광산  
학과, 공학사  
1967년 전북대학교 공과대학 채광  
야금학과, 공학석사  
1986년 전남대학교 대학원 자원공  
학과, 공학박사

Tel : 0652-270-2360  
E-mail : kys2360@moak.chonbuk.ac.kr  
현 재 전북대학교 공과대학 자원공학과, 교수