불연속면 연결구조의 삼차원 가시화 기법에 관한 연구

노영환 · 엄정기*

부경대학교 에너지자원공학과

Methods of Discontinuity Network Visualization in 3-D

Young-Hwan Noh and Jeong-Gi Um*

Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

암반의 구조적 특성에 대한 확고한 이해는 지반구조물의 효과적인 설계 및 유지관리에 있어서 매우 중요한 요소이다. 이는 암반의 강도, 변형 및 수리지질학적 특성이 주로 암반에 존재하는 불연속면의 연결구조 특성에 좌우되기 때문이다. 그동안 암반의 구조적 특성에 대한 연구에 있어서 상당한 진전이 있었음에도 불구하고 불연속면 분포의 복잡성으로 인하여 암반의 삼차원적 구현 및 가시화에 기반한 지질공학적 해석은 드문 실정이다. 이 연구는 암반의 불연속면 및 불연속면의 연결구조를 삼차원적으로 구현하고 가시화하는 기법을 제시하였다. 이를 위하여 원판형으로 가정된 불연속면의 비선형 방정식을 유도하고 불연속면 교차선과 등가파이프의 위치를 산정할 수 있는 대수학적 알고리즘이 제시되었으며, 또한 연산과정을 수행하는 전산모듈이 작성되었다. 이 연구에서 개발한 불연속면 연결구조의 삼차원적 구현 및 가시화 기법은 불연속면 기반의 암반강도 및 변형성에 관한 연구 또는 수리지질학적 특성에 관한 연구를 수행함에 있어서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

주요어 : 불연속면, 연결구조, 삼차원 가시화, 지질수학

A sound understanding of the structural characteristics of fractured rock masses is important in designing and maintaining earth structures because their strength, deformability, and hydraulic behavior depend mainly on the characteristics of discontinuity network structures. Despite considerable progress in understanding the structural characteristics of rock masses, the complexity of discontinuity patterns has prevented satisfactory analysis based on a 3-D rock mass visualization model. This paper presents the results of studies performed to develop rock mass visualization in 3-D to analysis the mechanical and hydraulic behavior of fractured rock masses. General and particular solutions of non-linear equations of disk-shaped fractures have been derived to calculated lines of intersection and equivalent pipes. Also, program modules have been developed to perform the calculations. The procedures developed for the 3-D fractured rock mass visualization model can be used to characterize rock mass geometry and network systems effectively. The results obtained in this study will be refined and then combined for use as a tool for assessing geomechanical problems related to strength, deformability and hydraulic behaviors of the fractured rock masses.

Key words : fracture, network, 3-D visualization, geomathematics

서 언

*Corresponding author: jum@pknu.ac.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

우리나라는 최근 비교적 단기간 동안 자원, 환경, 건설 등의 공공 분야에서 비약적인 양적, 질적 성장을 이루었다. 이에 관련 분야에 대한 연구개발 및 인력양성에 있어서 국가적인 지원과 투자가 있었기에 가능하였

다고 볼 수 있다. 그러나 긍정적인 성과 이면에는 부작용도 따르므로, 현시점에서 이를 최소화하기 위한 관련 산학연의 역할이 매우 중요하다. 예로서 암반거동에 따른 지반구조물의 안정성 저하나 터널의 붕괴, 사면 개착에 따른 사태 및 낙석발생, 자원개발에 따른 지반침하 및 산배수 발생, 지보의 과다설계에 따른 고비용 지출, 수리지질학적 환경변화에 따른 지하수 고갈 및 오폐수 침출 등 다양한 부작용이 현재 가시화되고 있는 실정이다. 이러한 부작용을 최소화하고 국가인프라의 건전한 유지 및 확충을 위해서 대상 암반의 수리·역학적 특성에 대한 확고한 이해는 필수적이다.

암반의 수리·역학적 특성은 암반을 구성하는 암석의 물질적 특성에 좌우되지만 암반 내에 존재하는 절리, 단층, 전단대, 파쇄대, 층리, 엽리 등과 같은 불연속면(discontinuity)에 의해서도 큰 영향을 받으므로 불연속면에 대한 연구는 지질공학 분야에서 중요한 주제로 인식되고 있다. 일반적으로 불연속면은 무결암(intact rock)에 비하여 낮은 전단강도 및 인장강도, 높은 수리전도도를 가지며 암반의 강도를 저하시키고 변형을 유발하는 주요한 요인으로 작용한다. 따라서 불연속암반의 수리·역학적인 특성을 규명하고 지질공학적 활용성을 제고하는데 있어서 중요한 절차 중 하나는 현장의 지질 및 구조 특성에 따른 불연속면의 분포양상 및 상태를 정확하게 인지하는 것이다. 단층, 전단대, 암맥과 같은 대규모의 불연속면은 각각의 확정적 특성이 지질공학적으로 중요한 의미를 지니지만, 절리와 같은 소규모의 불연속면은 각각의 개별적인 특성보다 전체적인 분포특성이 더욱 중요시 된다(Heo et al., 2006). 이 연구는 소규모 불연속면으로 취급될 수 있는 균열/미시구조에 중점을 둔다.

일반적으로 불연속면은 기하학적으로 큰 변동성을 수반하며, 이에 대한 해석을 위하여는 확률론적 또는 추계론적 기법(Priest and Hudson, 1976, 1981; Kulatilake et al., 1993, 2003; Song and Lee, 2001; Ryu et al., 2002a, 2002b; Heo et al., 2006)을 적용하는 것이 보편적이다. 이와 같이 추계론적 기법을 통하여 구현된 불연속암반을 바탕으로 지하수 유동특성에 관한 연구(Wang et al., 2002), 암반의 강도 및 변형성에 관한 연구(Kulatilake et al., 2004) 등의 지질공학적 수치해석연구를 수행함에 있어서 어느 정도 진전이 있었음에도 불구하고 불연속면 분포의 복잡성으로 인하여 암반의 삼차원적 구현 및 가시화에 기반한 지질공학적 해석은 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 기존에 지하 불연속면 분포의 가시화 실용연구(Song and Park, 2002)

Fig. 1. 3-D cartesian coordinate system.

를 비롯하여 절취사면에 대한 불연속면 연결구조의 삼차원 가시화 연구(Heo et al., 2006) 등 불연속암반에 대한 삼차원 가시화 및 공학적 활용에 대한 연구가 수행된 바 있지만 절취면 또는 이차원 단면상에 나타난 불연속면의 트레이스를 가시화하는 방법을 채택하여 불연속면의 네트워크 시스템에 대한 구조기하형태를 삼차원적으로 인식하는데 한계가 있었다.

이 연구에서는 불연속면을 원판 또는 다각형의 형태로 가정하고 이들의 삼차원 가시화 기법을 제시하였다. 또한, 암반의 역학적 및 수리적 특성에 지대한 영향을 미치는 불연속면 연결구조의 구조기하형태를 구현하고 이를 가시화하기 위한 대수학적 알고리즘을 제시하였으며 연산과정을 수행하는 전산프로그램을 작성하여 사용자 중심적 GUI(graphical user interface) 기반의 불연속암반 해석 시스템 개발을 위한 토대를 구축하였다.

불연속면의 삼차원 가시화

이 연구에서 삼차원 불연속면의 구현을 위하여 사용된 삼차원 직교좌표계는 Fig. 1과 같다. 불연속면의 가시화 모델에서 불연속면을 원판형으로 가정하였을 때 각각의 원판은 삼차원 공간에서 불연속면의 중심좌표, 반경 및 경사방향/경사로 구현될 수 있다. 이 연구에서는 임의의 크기 및 방향성을 갖는 불연속면의 경계를 이루는 원을 표현하기 위하여 원주상에 점의 개수를 설정하고 각각의 점에 대한 삼차원 좌표를 계산하여 점들을 연결하는 방식을 채택하였다. 즉, 원주상에 설정되는 점의 개수가 증가할수록 구현된 불연속면은 다각형에서 원

에 근접하는 형상을 이루게 된다.

이차원 X-Y 평면에서 반경이 r 이고 원점(0, 0, 0)을 중심으로 하는 수평 불연속면의 원주상에 위치하는 임의의 점의 좌표 (X , Y , Z)는 다음과 같다.

$$X = r \cos \theta \quad (1a)$$

$$Y = r \sin \theta \quad (1b)$$

$$Z = 0 \quad (1c)$$

여기서, θ 는 원점에서 원주상의 점을 연결한 선분과 X축이 이루는 각이다.

식 (1)에 의해 구현된 X-Y 평면상의 원이 경사방향과 경사를 갖는다면 임의의 점(X , Y , Z)가 경사방향/경사(α/β)에 의해 이동하는 좌표변환 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

즉, 식 (2)에 의하여 X축을 회전축으로 경사 β 만큼 회전시킨 후 식 (3)에 의하여 Z축을 회전축으로 경사방향 α 만큼 회전시키면 경사방향/경사가 α/β 인 원판형 불연속면에서 점(X'' , Y'' , Z'')의 좌표가 산정될 수 있다. 이때 구현된 경사방향/경사가 α/β 인 원판형 불연속면의 중심좌표는 원점이므로 Fig. 2에서와 같이 최종적으로 가시화하고자 하는 불연속면의 중심좌표가 점(X_0 , Y_0 , Z_0)이라면 점(X'' , Y'' , Z'')은 다음 식에 의한 좌표변환을 통하여 점(X_n , Y_n , Z_n)으로 이동한다.

$$X_n = X'' + X_0 \quad (4a)$$

$$Y_n = Y'' + Y_0 \quad (4b)$$

$$Z_n = Z'' + Z_0 \quad (4c)$$

이와 같은 방법으로 구현되는 불연속면은 θ 를 입력변수로 설정하면 삼각형($\theta=120^\circ$), 사각형($\theta=90^\circ$) 등 θ 에 따라 다양한 모양으로 가시화 될 수 있다. 이 연구에서는 앞에서 제시한 절차를 바탕으로 FORTRAN90 기반의 가시화 모듈을 코딩하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 동일한

Fig. 2. Schematic diagram of disk-shaped fracture in 3-D.

불연속면 구조에 대하여 개발된 가시화 모듈을 통하여 원판형의 불연속면을 삼차원적으로 가시화한 사례이며, 사용자가 지정한 방향에 따라 각각 다른 모습으로 불연속면 연결구조가 가시화되는 예를 보여준다. 이 연구에서 제시한 삼차원 불연속면 가시화 기법은 암반 불연속면의 분포를 시각적으로 표현함으로써 불연속면의 구조적 특성을 파악하는 데에 기여할 수 있으며 차후 단계의 연구수행에 있어서 핵심요소로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

불연속면의 삼차원 연결구조

불연속면의 연결구조는 암반의 이방적 수리상수 및 강도정수에 지대한 영향을 미친다(Wang et al., 2002; Bang et al., 2003; Kulatilake et al., 2004). 또한, 굴착 시 자유면에 존재할 수 있는 키블록은 불연속면의 교차선에 따라 형상 및 크기가 결정된다. Hudson and La Pointe (1980)가 이차원적 불연속면 연결구조를 바탕으로 시도한 지하수 유동에 관한 연구는 전 세계의 연구자들로부터 주목을 받았으며 많은 관련 연구를 파생시켰다. Wang et al. (2002)은 삼차원 불연속면 연결구조를 바탕으로 한 불연속면이 다른 불연속면과 교차하는 경우 등가수리전도도를 갖는 선형의 등가파이프(equivalent pipes)를 구성한 후 불연속체 기반의 지하수 유동모델을 통하여 현장의 불연속면의 연결구조 시스템이 삼차원 수리전도도 텐서의 주방향성을 결정한다는 연

Fig. 3. Examples of disk-shaped discontinuities in 3-D.

Fig. 4. Lines of intersections and corresponding equivalent pipes in conceptual pipe flow model in 3-D.

구결과를 제시한 바 있다.

이 연구에서는 두 개 이상의 원판형 불연속면이 삼차원 공간에서 교차할 때 형성되는 교차선의 좌표를 산정하고 이를 가시화 할 수 있는 전산모듈을 개발하였다. 또한, 개발된 전산모듈은 불연속체 기반의 지하수유동모델에 이용하기 위하여 각각의 원판형 불연속면의 중심과 교차선의 중점을 연결하는 등가파이프(Wang et al., 2002)의 좌표도 산정할 수 있도록 고안되었다. Fig. 4는 삼차원 파이프유동모델에서 원판형 불연속면에 의해 형성되는 불연속면의 교차선 및 등가파이프의 예를 나타낸 개념도이다.

비선형 연립방정식의 일반해

불연속면의 가시화 모델에서 불연속면을 특정한 크기의 원판으로 가정할 때 원판형으로 가정된 불연속면은 중심좌표와 불연속면의 반경(직경) 및 경사방향/경사로 구성된다. 이와 같이 묘사된 불연속면이 다른 불연속면과 교차할 때 나타나는 불연속면 연결구조를 산정하고 가시화하기 위해서는 각 불연속면에 대한 방정식을 유도한 후 연립방정식의 해를 구해야 한다. 공간상에서 원판형으로 가정된 불연속면을 정의하기 위한 원의 방정식은 구와 특정한 방향성을 갖는 평면의 교선으로 유도할 수 있다. 즉, 원의 방정식은 구와 특정한 방향성을 갖는 평면의 연립방정식으로 표현된다. 법선방향이 $[a, b, c]$ 이고 점(L, M, N)을 지나는 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$a(x-L) + b(y-M) + c(z-N) = 0 \quad (5)$$

평면위의 점(L, M, N)을 중심으로 반경이 r 인 구의 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(x-L)^2 + (y-M)^2 + (z-N)^2 = r^2 \quad (6)$$

삼차원 공간상에서 식 (5), (6)를 연립하여 유도한 원의 방정식은 삼차원 불연속면 연결구조 모델에서 특정한 방향성을 갖는 원판형 불연속면의 방정식으로 취급될 수 있다.

Fig. 5는 공간상에서 불연속면의 방향성을 나타낼 때 사용하는 요소인 경사방향(α_d)과 경사(β_d)를 나타낸 모식도이다. 평면은 무한한 선들이 한 점을 중심으로 방사형으로 동일 면상에 분포한 것과 같다. 이런 선들 중의

Fig. 5. Dip and dip direction of a discontinuity.

하나가 최대경사를 갖는 선이 될 것이다. Fig. 5에서 경사벡터(dip vector)로 표시된 최대경사를 가지는 선의 선주향(α_d)과 아래로 향하는 선경사(β_d)가 각각 불연속면의 경사방향과 경사로 정의된다. 평면의 법선은 주어진 면에 수직인 가상적인 선으로, 양 끝은 아래나 위로 향하지만 여기서는 면의 아래로 향하는 선을 법선으로 정의하여 선주향(α_n)과 선경사(β_n)로 표기한다. 현장에서 측정된 불연속면의 방향성 α_d/β_d 와 불연속면의 법선 α_n/β_n 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\alpha_n = \alpha_d \pm 180^\circ \quad (0^\circ \leq \alpha_n \leq 360^\circ) \quad (7)$$

$$\beta_n = 90^\circ - \beta_d \quad (0^\circ \leq \beta_n \leq 90^\circ) \quad (8)$$

또한, 평면의 경사방향 대신 주향을 알고 있을 때 경사방향과의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_s = a_d - 90^\circ \quad (0^\circ \leq a_s \leq 360^\circ) \quad (9)$$

삼차원 직교좌표계에서 원점이 시작점인 선의 크기 $|m|$ 은 다음과 같다.

$$|m| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad (10)$$

선주향/선경사가 α_n/β_n 인 벡터의 삼차원 좌표성분 (n_x, n_y, n_z)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_x = |m| \sin \alpha_n \cos \beta_n \quad (11a)$$

$$n_y = |m| \cos \alpha_n \cos \beta_n \quad (11b)$$

$$n_z = |m| \sin \beta_n \quad (11c)$$

여기서, $|m| = 1$ 인 단위벡터의 경우 좌표성분 ($n_x, n_y,$

Fig. 6. Example of intersection by two disk-shaped discontinuities.

n_z)는 방향여현이 되며, 식 (5)의 면에 수직인 법선벡터의 방향여현은 a, b, c 이다.

Fig. 6은 두 개의 원판형 불연속면이 교차하여 나타나는 연결구조의 예이다. 법선의 방향성분이 각각 $[a_1, b_1, c_1], [a_2, b_2, c_2]$ 이고, 임의의 점 $O_1(L, M, N), O_2(U, V, W)$ 를 지나는 무한평면의 평면방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$a_1(x-L) + b_1(y-M) + c_1(z-N) = 0 \quad (12)$$

$$a_2(x-U) + b_2(y-V) + c_2(z-W) = 0 \quad (13)$$

식 (12), (13)에서 $x-L=X, y-M=Y, z-N=Z$ 로 치환하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$a_1X + b_1Y + c_1Z = 0 \quad (14)$$

$$a_2X + b_2Y + c_2Z = d \quad (15)$$

여기서, d 는 치환에 의해 산정되는 상수이다. 식 (14)와 식 (15)를 연립하면 두 무한평면이 교차하여 생성되는 직선의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = PZ + t_1 \quad (16a)$$

$$Y = QZ + t_2 \quad (16b)$$

여기서, P, t_1, Q, t_2 는 각각 다음과 같다.

$$P = \frac{(a_2c_1 - a_1c_2)}{a_2b_1 - a_1b_2} \quad (17a)$$

$$t_1 = \frac{a_1d}{a_2b_1 - a_1b_2} \quad (17b)$$

$$Q = \frac{(b_1c_2 - b_2c_1)}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad (17c)$$

$$t_2 = \frac{b_1 d}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (17d)$$

따라서 두 무한평면방정식 식 (14)와 식 (15)가 교차하여 형성된 교차선의 방정식은 다음과 같은 매개변수 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{X-t_2}{Q} = \frac{Y-t_1}{P} = Z = T \quad (18)$$

여기서, T 는 매개변수이다.

임의의 점 $O_1(L, M, N)$ 과 $O_2(U, V, W)$ 을 지나는 두 무한평면의 교차선의 방정식은 식(18)로 나타낼 수 있으며, 무한평면을 $O_1(L, M, N)$ 과 $O_2(U, V, W)$ 를 중심으로 하는 원판형의 불연속면으로 한정하였을 때 이들 간의 교차 여부는 교차선과 각각의 구의 중심 간의 수직거리를 계산하고 원의 반지름과 비교하여 확인할 수 있다. 교차선과 구 중심 간의 거리가 구의 반지름 보다 큰 경우에는 교차선을 형성하지 못하므로 연산을 생략하는 것이 바람직하다. 점 O_1 을 중심으로 하는 구의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = r_1^2 \quad (19)$$

식 (18)로부터 O_1 과 수직거리에 있는 교차선 상의 점 $F_1(QT+t_2, PT+t_1, T)$ 간의 거리 d_1 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_1 = \sqrt{(QT+t_2)^2 + (PT+t_1)^2 + T^2} \quad (20)$$

여기서, T 는 다음과 같이 유도된다.

$$T = -(Qt_2 + Pt_1)/(Q^2 + P^2 + 1) \quad (21)$$

같은 방식으로 점 O_2 를 중심으로 하는 구의 방정식으로 부터 O_2 와 수직거리에 있는 교차선 상의 점 F_2 간의 거리 d_2 도 구할 수 있다. 두 원판형 불연속면은 d_1 이 r_1 보다 작거나 같고 d_2 가 r_2 보다 작거나 같은 경우에만 교차선을 형성한다. 또한, 식 (18), 식 (19)로부터 교차선 선분의 좌표가 산정될 수 있다.

비선형 연립방정식의 특수해

비선형 연립방정식의 해를 구하는 과정에서 연산을 수행할 수 없는 경우가 발생한다. 즉, 기하학적으로 두 불연속면이 평행한 경우와 일치하는 경우 및 수학적으로 분모에 0이 존재하는 경우는 연립방정식이 성립하지 않기 때문이다. 이 연구에서는 이러한 경우를 특수해로

분류하고 경우에 따른 해를 유도하였다.

식 (14)와 식 (15)에 의해 정의되는 두 불연속면의 경사방향이 동일한 경우 $a_1 b_2 = a_2 b_1 \neq 0$ 가 성립할 수 있다. 이러한 경우 식 (14)와 식 (15)로부터 유도할 수 있는 다음 두 식을 연립하여 Z 와 X 를 구할 수 있다.

$$b_2 a_1 X + b_2 b_1 Y + b_2 c_1 Z = 0 \quad (22)$$

$$b_1 a_2 X + b_1 b_2 Y + b_1 c_2 Z = b_1 d \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)으로부터 해를 구하면 다음과 같다.

$$Z = \frac{-b_1 d}{b_2 c_1 - c_2 b_1} \quad (24)$$

$$X = \frac{b_1 d - (b_2 c_1 + c_2 b_1) Z}{2 a_1 b_2} - \frac{b_1 b_2 Y}{a_1 b_2} \quad (25)$$

식 (19), 식 (24), 식 (25)로부터 X, Y, Z 를 구하면 원판형 불연속면 교차선의 좌표를 얻을 수 있다. 이 연구에서는 이와 같이 일반적으로 연산을 수행할 수 없는 모든 경우를 분류하고 각각에 대한 특수해를 유도하여 Table 1에 수록하였다. Table 1에서 $a_1 = b_1 = 0$ 과 $a_2 = b_2 = 0$ 조건은 두 원판형 불연속면 중 하나가 수평인 경우이다. $a_1 = a_2 = 0$ 과 $b_1 = b_2 = 0$ 조건은 두 불연속면의 경사방향이 동일한 경우이며, $a_1 = b_1 = b_2 = 0$ 은 두 불연속면이 평행한 경우이다.

불연속면의 연결구조

불연속면의 교차선 및 불연속면의 중심과 교차선의 중점을 연결하는 등가파이프의 위치를 산정하고 가시화하기 위해서는 앞에서 계산한 각각의 불연속면 중심과 교차선 간의 수직거리와 불연속면 반지름과의 관계를 파악하여 불연속면의 교차 여부가 확인되어야 한다. Fig. 7은 불연속면이 교차선과 한 점에서 접하거나 두 점 사이에서 교차하는 경우를 나타낸다. 따라서 두 원판의 교차 여부는 $d_1 \leq r_1, d_2 \leq r_2$ 이면 두 원판형 불연속면이 교차될 가능성이 있다고 볼 수 있다. Fig. 8에서와 같이 두 원판형 불연속면이 교차할 때 형성되는 교차선의 중점을 M 이라 하고, E_1, E_2, E_3, E_4 를 두 원판형 불연속면이 교차선과 접하는 점이라고 가정하면 일반적으로 $\overline{O_1 F_1} + \overline{O_2 F_2} \leq r_1 + r_2$ 일 때 두 원판형 불연속면은 교차된다.

Fig. 9는 삼차원 공간에서 두 원판형 불연속면이 교차할 때 나타날 수 있는 교차선과 등가파이프의 다양한 형태를 보여준다. Fig. 9(a)는 두 원판형 불연속면의 원주가 한 점에서 접하는 경우로서 교차선은 형성되지 않

Table 1. Lists of particular solutions of non-linear equations.

Special case	Particular solutions
$a_1 b_2 = a_2 b_1 \neq 0$	$X = \frac{b_1 d - (b_2 c_1 + c_2 b_1) Z}{2 a_1 b_2} - \frac{b_1 b_2}{a_1 b_2} Y, Z = \frac{-b_1 d}{b_2 c_1 - c_2 b_1}$
$a_1 = b_1 = 0$	$X = \frac{d}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} Y, Z = 0$
$a_2 = b_2 = 0$	$X = \frac{-c_1 d / c_2}{a_1} + \frac{-b_1}{a_1} Y, Z = \frac{d}{c_2}$
$a_1 = a_2 = 0$	$Y = \frac{-c_1 d}{c_2 b_1 - c_1 b_2}, Z = \frac{-b_1 d}{b_2 c_1 - b_1 c_2}$
$b_1 = b_2 = 0$	$X = \frac{-c_1 d}{c_2 a_1 - c_1 a_2}, Z = \frac{-a_1 d}{a_2 c_1 - a_1 c_2}$
$a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0$	N/A

Fig. 7. Two cases of intersection of discontinuity planes. **Fig. 8.** Line of intersection between two discontinuity planes in general case.

는다. 이 경우에 각각의 원판에서 $d_1 = r_1$, $d_2 = r_2$ 이며, 등가파이프 구성에 필요한 좌표는 두 원판형 불연속면의 중심 O_1 , O_2 와 두 원판이 만나는 교차점 M 이다. Fig. 9(b)는 두 원판형 불연속면에 의한 교차선이 각각의 불연속면에서 현을 이루는 경우로서 교차선의 양 끝 점은 두 원판의 원주상에 위치한다. 이 경우에 각각의 원판에서 $d_1 < r_1$, $d_2 < r_2$ 이고, 원판의 교차점들의 관계는 $E_1 = E_3$, $E_2 = E_4$ 이므로 교차선은 $\overline{E_1 E_2}$ 이며, 등가파이프는 O_1 , O_2 와 $\overline{E_1 E_2}$ 의 중점을 연결하여 구성할 수 있다. Fig. 9(c)는 원판형 불연속면의 원이 다른 원판형 불연속면 위에 접하는 경우이다. 이 경우에 각각의 원판에서 $d_1 < r_1$, $d_2 = r_2$ 또는 $d_1 = r_1$, $d_2 < r_2$ 이다. 이 때 등가파이프 구성에 필요한 좌표는 O_1 , O_2 와 두 원판

Fig. 9. Possible types of intersection between two discontinuity planes.

이 만나는 점 M 이다. Fig. 9(d)는 불연속면 교차선의 양 끝점이 각각 서로 다른 불연속면 내에 위치하는 경우이다. 이 경우에 각각의 원판에서 $d_1 < r_1$, $d_2 < r_2$ 이며, 교차선은 $\overline{E_1E_4}$ 또는 $\overline{E_2E_3}$ 이다. 등가파이프는 O_1 ,

O_2 와 $\overline{E_1E_4}$ 또는 $\overline{E_2E_3}$ 의 중점을 연결하여 구성할 수 있다. Fig. 9(e)는 하나의 원판형 불연속면 내에 다른 원판형 불연속면이 포함되어 교차하는 경우이다. 이때 두 불연속면의 교차선 상에서 $\overline{E_1E_2} > \overline{E_3E_4}$ 또는

Fig. 10. Fracture network visualization in 3-D for a 5 m cube at the Il-Gwang Mine.

$\overline{E_1E_2} < \overline{E_3E_4}$ 의 관계가 성립하며, 교차선은 각각의 경우 $\overline{E_3E_4}$ 또는 $\overline{E_1E_2}$ 이다. 등가파이프는 O_1 , O_2 와 $\overline{E_3E_4}$ 또는 $\overline{E_1E_2}$ 의 중점을 연결하여 구성할 수 있다.

이 연구에서는 불연속면의 교차선 및 등가파이프 등의 연결구조를 구현하고 가시화하기 위하여 상기와 같이 다양한 형태의 교차조건을 고려한 FORTRAN90 기반의 전산모듈을 작성하였다. 연결구조 모듈은 불연속면의 교차선 또는 등가파이프의 삼차원 공간좌표를 출력할 수 있도록 코딩되었다. Fig. 10은 부산시 기장군에 위치한 일광광산의 절리자료(Choi et al., 2010)를 바탕

으로 앞에서 언급한 가시화 모듈과 연결구조 모듈에 의하여 원판형 불연속면의 연결구조를 구현하고 가시화한 사례이다. 이 연구의 가시화 모듈은 대상암반에 대한 불연속면의 방향성, 크기, 빈도에 관한 정보를 시각적으로 제공할 수 있으며, 원판형 불연속면을 정방형으로 설정하여 출력하면 암반의 강도 및 변형성과 관련된 불연속체 기반의 수치해석을 위한 입력 자료를 구성하는 데에 활용할 수 있다. 이 연구의 연결구조 모듈을 통하여 구현할 수 있는 불연속면의 교차선은 암반 굴착에 따른 삼차원 키�블록 해석 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대되며, Fig. 10(b)와 같은 등가파이프의 구현은 암반에 대한 지하수유동 채널에 대한 정보를 제공함으로써 암반의 수리특성에 관한 연구에 있어서 활용도가 높을 수 있다고 판단된다.

결 언

이 연구는 사용자 중심적 GUI 기반의 불연속암반 해석시스템 개발의 일환으로 불연속면에 대하여 원판 또는 다각형 형태로 가정한 삼차원 가시화 기법을 제시하였다. 또한, 불연속면 연결구조의 구조기하형태를 구현하고 이를 가시화하기 위한 대수학적 알고리즘을 제시하였으며, 연산과정을 수행하는 전산모듈을 개발하였다. 불연속면의 삼차원 가시화 모듈은 암반 불연속면의 방향성 및 크기 분포와 빈도를 시각적으로 표현함으로써 불연속암반의 구조적 특성을 파악하는 데에 기여할 수 있으며, 암반의 강도 및 변형성과 관련된 불연속체 기반의 수치해석을 위한 입력 자료를 구성하는 데에 활용할 수 있다. 연결구조 모듈은 불연속면의 교차선 또는 등가파이프의 삼차원 공간좌표를 출력할 수 있으며, 암반 굴착에 따른 삼차원 키�블록 해석 또는 지하수유동 특성에 관한 연구에 있어서 활용도가 높을 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2009학년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었음(PS-2009-0203).

참 고 문 헌

Bang, S. H., Jeon, S., and Choe, J., 2003, Determination of equivalent hydraulic conductivity of rock mass using three-dimensional discontinuity network,

- Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 13, 52-63.
- Choi, J., Um, J. G., Kwon, H. H., and Shim, Y. S., 2010, Relationship between characteristics of fracture distribution and acidity of mine drainage at the Il-Gwang Mine, The Journal of Engineering Geology, 20, 425-436.
- Heo, I. S., Um, J. G., Kim, Y. P., Kim, K. H., and Lee, Y. K., 2006, A case study on stochastic fracture network modeling for rock slopes of Busan-Ulsan highway(reach 5), The Journal of Engineering Geology, 16, 337-349.
- Hudson, J. and La Pointe, 1980, Printed circuits for studying rock mass permeability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 17, 297-301.
- Kulatilake, P. H. S. W., Um, J. G., Wang, M., Escandon, R. F., and Narvaiz, J., 2003, Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA, Engineering Geology, 70, 131-155.
- Kulatilake, P. H. S. W., Um, J. G., and Park, J. Y., 2004, Estimation of rock mass strength and deformability in 3-D for a 30m cube at a depth of 485m at Aspo Hard Rock Laboratory, Geotechnical and Geological Engineering, 22, 313-330.
- Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephenson, O., 1993, Joint Network modeling including a validation to an area in Strip mine, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 30, 503-526.
- Priest, S. D. and Hudson, J., 1976, Discontinuity spacing in rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 13, 135-148.
- Priest, S. D. and Hudson, J., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 18, 183-197.
- Ryu, D. W., Kim, Y. M. and Lee, H. K., 2002a, A study of statistical analysis of rock joint size and intensity by stereological approach, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 12, 10-18.
- Ryu, D. W., Kim, Y. M., and Lee, H. K., 2002b, A Study of statistical analysis of rock joint directional data, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 12, 19-30.
- Song, J. J. and Lee, C. I., 2001, Study on the estimation of joint length distribution using window sampling, Journal of the Korean Geotechnical Society, 17, 21-30.
- Song, M. Y. and Park, C. S., 2002, Practical visualization of discontinuity distribution in subsurface using borehole image analysis, The Journal of Engineering Geology, 12, 23-34.
- Wang, M., Kulatilake, P. H. S. W., Um, J. G., and Narvaiz, J., 2002, Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 887-904.

원고접수일 : 2012년 12월 6일
수정본채택 : 2012년 12월 23일(1차)
2012년 12월 26일(2차)
게재확정일 : 2012년 12월 26일

노영환

부경대학교 에너지자원공학과
608-737 부산광역시 남구 용소로 45
Tel: 051-629-6559
Fax: 051-629-6553
E-mail: nyh3224@nate.com

엄정기

부경대학교 에너지자원공학과
608-737 부산광역시 남구 용소로 45
Tel: 051-629-6559
Fax: 051-629-6553
E-mail: jum@pknu.ac.kr