

## 삼차원 불연속면 연결구조 해석 및 가시화 소프트웨어 모듈 개발

노영환, 최요순, 엄정기\*, 황석연

## Development of the 3-D Fracture Network Analysis and Visualization Software Modules

Young-Hwan Noh, Yosoon Choi, Jeong-Gi Um\*, Sukyeon Hwang

**Abstract** As part of the development of the 3-D geologic modeling software, this study addresses on new development of software modules that can perform the analysis and visualization of the fracture network system in 3-D. The developed software modules, such as BOUNDARY, DISK3D, FNTWK3D, CSECT and BDM, are coded on Microsoft Visual Studio platform using the MFC and OpenGL library supported by C++ program language. Each module plays a role in construction of analysis domain, visualization of fracture geometry in 3-D, calculation of equivalent pipes, production of cross-section map and management of borehole data, respectively. The developed software modules for analysis and visualization of the 3-D fracture network system can be used to tackle the geomechanical problems related to strength, deformability and hydraulic behaviors of the fractured rock masses. All these benefits will further enhance the economic competitiveness of the domestic software industry.

**Key words** Fracture, Network, 3-D visualization, Software

**초 록** 본 연구는 삼차원 지질 모델링 소프트웨어 개발의 일환으로 불연속면의 구조기하형태에 대한 삼차원적 해석 및 가시화를 수행 할 수 있는 새로운 소프트웨어 모듈을 개발하는 데에 목적이 있다. 불연속면 연결구조의 삼차원 해석 및 가시화 알고리즘을 바탕으로 개발된 소프트웨어는 C++언어 기반의 MFC 및 OpenGL 라이브러리를 응용하여 Microsoft Visual Studio 상에서 제작되었다. 개발된 소프트웨어는 BOUNDARY, DISK3D, FNTWK3D, CSECT, BDM 등의 모듈을 포함하며 각각의 모듈은 해석영역 구성, 불연속면 네트워크 시스템의 가시화, 등가파이프의 산정, 단면도 작성, 시추공 자료 관리 등 절리성 암반의 삼차원 구조기하형태 해석에 관련된 다양한 기능을 수행한다. 이 연구에서 개발한 불연속면 연결구조의 삼차원 가시화 및 해석 소프트웨어는 불연속면 기반의 암반강도 및 변형성에 관한 연구, 수리지질학적 특성에 관한 연구 및 사면안정 연구를 수행함에 있어서 활용도가 높을 것으로 판단되며 국내 소프트웨어 산업의 경쟁력을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심어** 불연속면, 연결구조, 삼차원 가시화, 소프트웨어

## 1. 서 론

삼차원 지반구조에 대한 확고한 이해는 광물자원 및

석유, 가스 등의 에너지자원과 관련된 분야의 연구개발에 있어서 필수적인 요소이다. 또한, 도로, 댐, 터널 및 지하공간 등과 같은 국가 기반시설의 입안 및 확충에 있어서도 정확한 지반구조에 대한 정보가 과업의 성패를 좌우한다. 현재 대다수의 국내외 연구자 및 현장 전문가는 과업 지역에 대한 삼차원 지반구조 모델링을 수행하기 위하여 Schlumberger사의 Petrel Geology (<http://www.software.slb.com/products/platform/pages/petrel-geology-modeling-software.aspx>), Paradigm사의 SKUA (<http://www.pdgm.com/products/SKUA>), Gemcom사의 GEMS (<http://www.gemcomsoftware.com/products/>

Received: Jul. 31, 2013

Revised: Aug. 19, 2013

Accepted: Aug. 21, 2013

\*Corresponding Author: Jeong-Gi Um

Tel) +82516296559, Fax) +82516296553

E-Mail) jum@pknu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

gems) 및 MINEX (<http://www.gemcomsoftware.com/products/minex>), CTECH사의 EVS/MVS (<http://www.ctech.com/products/?page=mvs/evs>), VSG사의 Avizo Earth (<http://www.vsg3d.com/avizo/earth>), DGI사의 EarthVision(<http://www.dgi.com/earthvision/evmain.html>), Rockware사의 RockWorks (<http://www.rockware.com/product/overview.php?id=165>) 등의 상용 소프트웨어에 의존하고 있다. 이와 같은 소프트웨어는 시추공/로그 관리, 2D/3D 도면작성, 지질구조 모델링, 지질분포 모델링 등의 기능을 제공한다.

지질 모델링에 필요한 기능들을 대부분 제공하는 CTECH사의 EVS/MVS, VSG사의 Avizo Earth, DGI사의 EarthVision, Rockware사의 RockWorks 소프트웨어는 범용 지질 모델링 소프트웨어로서 석유가스 분야, 광물자원 분야, 지질공학 분야, 환경공학 분야 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이들 소프트웨어는 한 분야에 특화되어 있는 Paradigm사의 SKUA, Gemcom사의 GEMS 및 MINEX 등의 소프트웨어에 비해 상대적으로 저렴하며, 영구 라이선스의 구입이 가능하다는 장점이 있지만 암반 불연속면을 고려하는 기능을 포함하지 않는다. 석유가스 분야에서 지질 모델링을 위해 주로 사용되고 있는 Schlumberger사의 Petrel Geology와 Paradigm사의 SKUA 소프트웨어는 초보적인 수준의 불연속면 모델링 기능과 병렬처리 기능이 일부 추가되어 가장 많은 기능을 제공하지만 소프트웨어가 매우 고가이며, 영구 라이선스 구입을 할 수 없어 연 단위로 라이선스를 대여해야 한다.

광물자원 개발 분야에서 주로 활용되고 있는 Gemcom사의 GEMS 및 MINEX 소프트웨어는 지질 모델링을 수행하는데 필요한 대부분의 기능들을 제공하고 있다. 다만, 불연속면 모델링 기능과 병렬처리 기능은 아직까지 소프트웨어에 포함되어 있지 않다. 이들 소프트웨어는 석유가스 공학에서 사용되는 지질 모델링 소프트웨어와 달리 채광 계획 및 설계를 위한 최적화 기능이 소프트웨어에 추가되어 있는 것이 특징이다. 이들 역시 연 단위의 라이선스 임대 가능하며, 영구 라이선스는 매우 고가이다. 이와 같이 기존에 사용되고 있는 삼차원 지질 모델링을 위한 상용 소프트웨어는 고비용으로 인하여 교육 및 현장적용에 많은 어려움이 있으며, 또한 정교한 불연속면 분포 모델링 기능의 부재는 경쟁력 있는 새로운 소프트웨어의 개발에 대한 필요성을 증대시킨다.

본 연구에서는 불연속면 분포 모델링 기능을 포함하는 삼차원 지질 모델링 소프트웨어 개발의 일환으로 불연속면의 구조기하 형태를 삼차원적으로 가시화 하고

해석할 수 있는 소프트웨어를 개발하였고, 현장 자료를 사용하여 소프트웨어의 적용성을 검토하였다. 불연속면 연결구조의 삼차원 가시화 및 해석 알고리즘(Noh and Um, 2012)을 바탕으로 개발된 소프트웨어는 C++언어 기반의 MFC (microsoft foundation class) 및 OpenGL (open graphics library) 라이브러리를 응용하여 Microsoft Visual Studio 상에서 제작하였다.

## 2. 소프트웨어 개발 환경 및 도구

MFC는 C++언어를 기반으로 한 Windows 응용 프로그램(Win32) 제작을 위한 C++클래스 라이브러리의 집합이다(Kim and Shin, 2003). MFC는 기본적으로 700개가 넘는 방대한 Win32 API (application programming interface)를 기반으로 Windows 응용프로그램을 제작할 때 자주 사용되는 API들을 클래스화한 것이다. C++ 언어 기반의 툴로는 SDK (software development kit)와 MFC가 대표적이지만 응용프로그램을 개발할 때에는 MFC를 사용하는 것이 SDK를 사용하는 것보다 많은 이점이 있다. 이에는 MFC의 객체 지향을 이용하여 C++ 언어로 프로그래밍을 하면 함수의 복잡한 변환 없이도 Win32 SDK 함수를 이용할 수 있으며 보다 쉽고 빠르게 Windows 응용 프로그램을 개발할 수 있기 때문이다. 또한, MFC를 이용한 프로그래밍은 강한 타입체크, 예외처리, 객체의 생성자와 소멸자를 이용한 메모리 할당과 해지 등을 쉽게 사용할 수 있어 하드웨어 수준에서 프로그램의 구동 효율을 개선할 수 있으며, 매킨토시나 유닉스 버전으로도 쉽게 이식(porting)될 수 있다.

CWinAPP, CDocument, CFrameWnd, CView 등 크게 4개의 클래스로 구성된 MFC는 각각의 클래스가 서로 연동되어 입력에서 출력에 이르는 과정을 수행한다. CWinAPP 클래스는 응용프로그램 자체로서 프로그램을 구동시키고, 다른 클래스를 제어하는 기능을 수행한

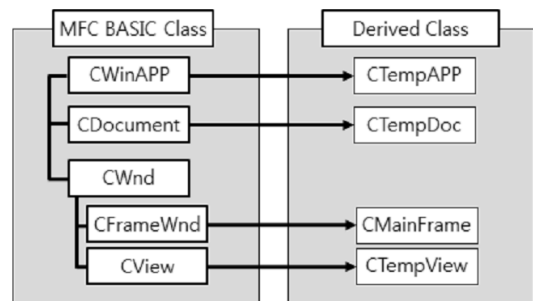


Fig. 1. MFC basic class and derived class



Fig. 2. OpenGL rendering procedure

다. CDocument 클래스는 데이터를 저장하고 관리하며, CFrameWnd 클래스는 윈도우의 크기, 위치, 상태 등의 조절에 관한 것과 메뉴, 툴바, 상태바 등을 설정한다. CView 클래스는 윈도우 화면을 구성하고 입력한 데이터를 화면에 출력하는 기능을 담당한다. Fig. 1은 MFC를 구성하는 4가지 기본 클래스가 Temp.exe 라는 응용 프로그램을 개발할 때에 생성되는 파생 클래스를 예시한 것이다. 파생 클래스는 개발자가 MFC 기본 클래스를 사용하여 응용프로그램을 코딩하였을 때 생성된다.

OpenGL (<http://www.opengl.org>)은 이차원 및 삼차원 그래픽스의 표준 API 규격으로 삼차원 API 시장을 다년간 주도해 온 라이브러리이다. OpenGL은 간단한 함수들로 구성되어 있으므로 개발 언어에도 독립적이며 C/C++, C#, 자바, 파이썬 등 대부분의 언어에서 사용 가능하다. OpenGL은 함수 기반이므로 C 언어가 가장 적합하지만, 객체 지향의 이점까지 고려하면 C++가 가장 유리하다. 무엇보다 문서와 예제가 풍부하고 재사용할 코드를 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 플랫폼과 언어에 독립적이므로 학습 및 개발 환경이 광범위하고 어떤 운영체제에서나 사용이 가능하다.

Fig. 2는 OpenGL의 삼차원 렌더링 과정을 나타내는 그림이다. Application(응용 단계)은 삼차원 모델에 대한 데이터를 읽고 위치 및 특성을 부여하는 과정이다. Geometry(기하 구조 단계)는 객체의 형태, 뷰 변환, 조명효과 처리, 투영 변환, 클리핑 등이 처리되는 단계이다. Rasterize(래스터화 단계)는 실제로 모니터의 각 픽셀 위치에 정확한 색상을 지정해주는 단계이다. 기본적으로 색상 정보가 객체에 부여되어 있으나 삼차원 상에서 객체들이 겹치는 경우에 z값 차이를 판별하여 출력할 이미지를 결정한다.

### 3. 소프트웨어의 기능

불연속면의 연결구조는 암반의 이방적 수리상수 및 강도정수에 지대한 영향을 미친다(Kim, 1999; Ju, 2000; 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. 이와 같은 불연속면 연결구조에 대한 삼차원적 해석 및 가시화는 사용자에게 절리성 암반의 구조에 대

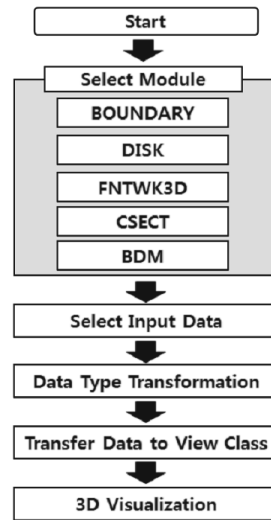


Fig. 3. Flowchart of the fracture network analysis and visualization in 3-D

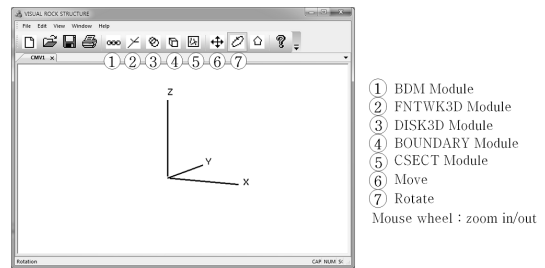


Fig. 4. 3-D cartesian coordinates system of the developed software modules

한 직관을 제공하고, 또한 차후 단계의 공학적 해석을 위한 입력 자료를 확보하는 데에 큰 역할을 담당할 수 있다.

이 연구에서 개발한 소프트웨어에서 불연속면의 삼차원 기하구조형태를 가시화하는 절차를 Fig. 3에 도시하였다. 소프트웨어에서 사용된 삼차원 직교좌표계의 좌표축은 X축이 동쪽, Y축이 북쪽, Z축이 고도이다. Fig. 4는 소프트웨어에서 사용된 좌표계와 소프트웨어의 메뉴 버튼에 대한 사항을 나타내고 있다. 메뉴 버튼은 BOUNDARY, DISK3D, FNTWK3D (fracture network 3D), CSECT (cross section), BDM (borehole data management) 등 총 다섯 개의 모듈을 사용 목적에 따라 각각 구동하여 불연속면의 연결구조 시스템을 구현하며 그래픽의 줌, 이동, 회전 기능을 수행하도록 설계하였다.

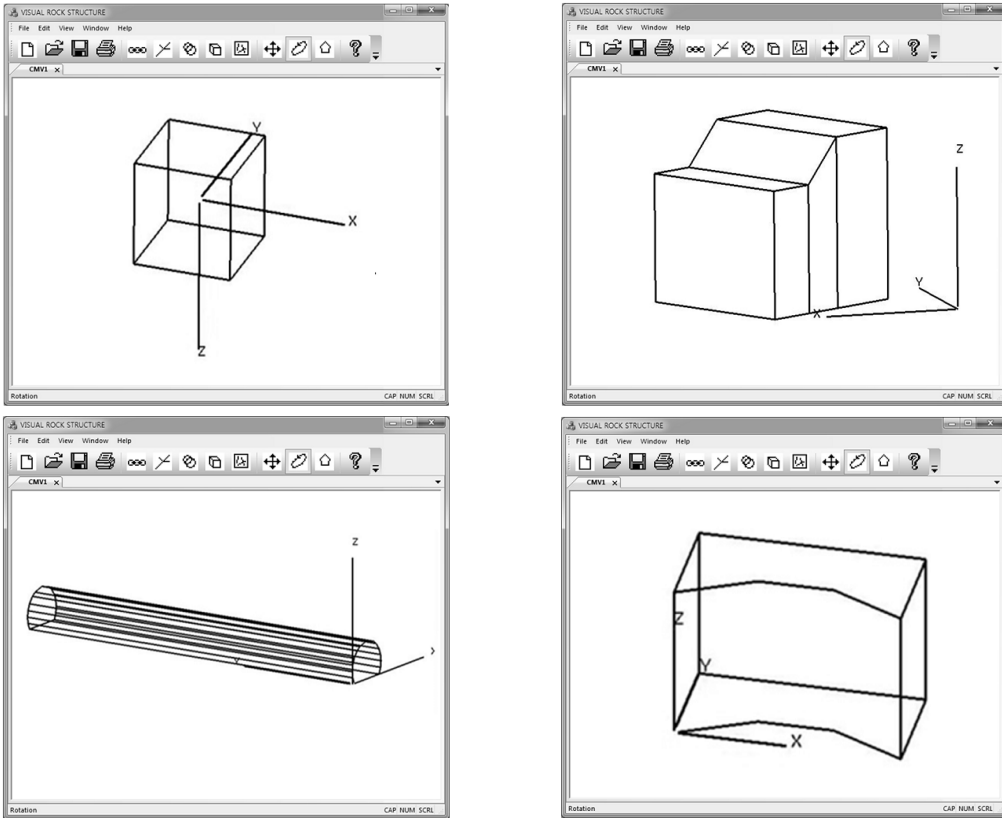


Fig. 5. Example outputs of the BOUNDARY module

```

//Draw Boundary;
glBegin(GL_LINE_LOOP);
glLineWidth(0.001f);
glColor4f(0.0f,0.0f,0.0f,1.0f);
for(int i=0; i<Count2; i++)
{
    glVertex3f(outx2[i],outy2[i],outz2[i]);
    for(int k=0; k<(Count2+1)/5; k++)
    {if(i==4+5*k)
    {
        glEnd();
        glBegin(GL_LINE_LOOP);
        glColor4f(0.0f,0.0f,0.0f,1.0f);
        glLineWidth(0.001f);
    }
    }
}
}

```

Fig. 6. Parts of the BOUNDARY module code

X0	Y0	Z0	Diamt	Dip.dir	Dip
9	9	7	7	98	65
3	5	5	6	102	64
4	8	9	6	105	63
8	3	9	7	95	60
6	7	4	12	100	59
5	7	5	6	94	58
7	4	5	7	103	62
3	7	4	12	104	66
6	4	8	11	101	56
8	6	8	7	103	58
9	2	9	12	2	15
6	5	4	10	8	17
4	3	6	6	5	10
8	3	5	9	355	8
9	7	4	12	358	11
9	4	6	10	357	12
2	5	2	11	354	14
4	7	2	9	35	16
8	7	2	11	4	13
6	5	5	12	7	12
3	6	3	6	280	40

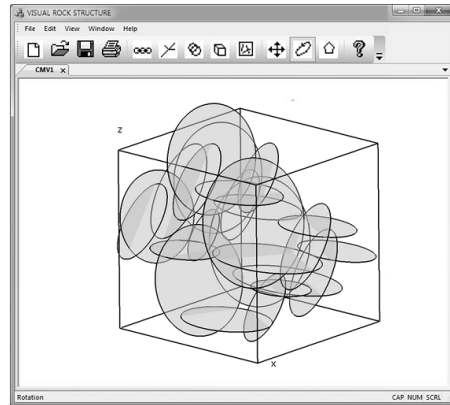
Fig. 7. An example of the input file

BOUNDARY 모듈은 터널, 사면, 해석영역 등 다양한 형태의 현장 제원을 도면으로 제공하는 기능을 담당한다. BOUNDARY 모듈은 영역 모서리의 삼차원 공간 좌표 자료를 이용하여 다양한 형태의 경계를 구현할 수

있다. Fig. 5는 BOUNDARY 모듈을 이용하여 다양한 해석영역의 경계면을 나타낸 사례이다. Fig. 6은 BOUNDARY 모듈의 코드 중 일부를 수록하였는데, 경계면을 구성하는 선의 색상은 glColor4f 코드에 의해

```
//Draw DISK3D
glBlendFunc(GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA, GL_SRC_ALPHA);
glColor4f(0.75f,0.75f,0.75f,0.5f);
glEnable(GL_BLEND);
glBegin(GL_POLYGON);
glColor4f(0.75f,0.75f,0.75f,0.5f);
for(int i=0; i<Count1; i++)
{
  glVertex3f(outx1[i],outy1[i],outz1[i]);
  for(int k=0; k<(Count1+1)/73; k++)
  {if(i==72+73*k)
  {
    glEnd();
    glBlendFunc(GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA, GL_SRC_ALPHA);
    glColor4f(0.75f,0.75f,0.75f,0.5f);
    glEnable(GL_BLEND);
    glBegin(GL_POLYGON);
  }
}
}
glEnd();
```

(a)

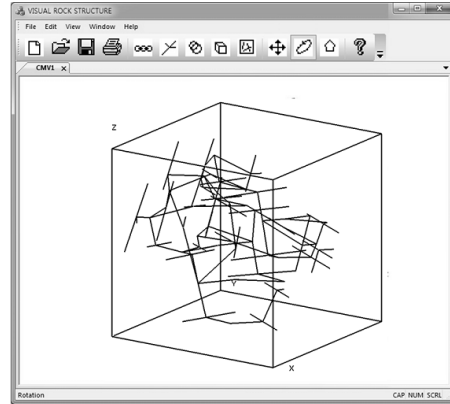


(b)

Fig. 8. (a) Parts of the DISK3D module code and (b) an example of output

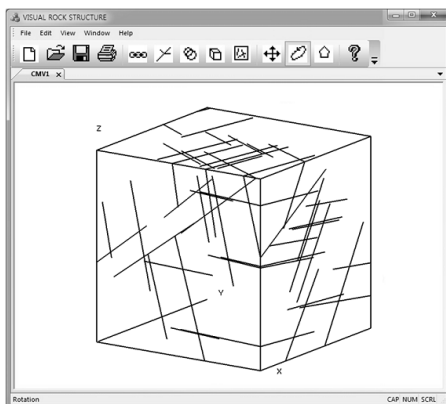
```
//DrawNETWORK(FNTWK3D)
glBegin(GL_LINES);
glColor4f(0.0f,0.0f,0.0f,1.0f);
glLineWidth(0.001f);
for(int i=0; i<Count; i++)
{
  glVertex3f(outx[i],outy[i],outz[i]);
}
glEnd();
glEnable(GL_BLEND);
glEnd();
```

(a)

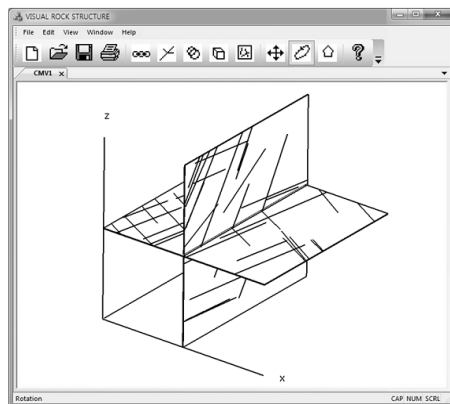


(b)

Fig. 9. (a) Parts of the FNTWK3D module code and (b) an example of output



(a)



(b)

Fig. 10. Example outputs of the CSECT module

RGB값으로 정의되며, 선의 두께는 `glLinewidth` 코드에 의해 결정된다.

DISK3D 모듈은 삼차원공간에서 원판 또는 다각형의 불연속면을 가시화하는 기법(Noh and Um, 2012)을 바탕으로 작성하였다. Fig. 7은 DISK3D 모듈을 구동하기 위한 입력파일의 예이며, 입력파일은 불연속면 중심점의 (x, y, z) 좌표, 불연속면의 직경, 경사방향, 경사 등의 자료를 포함한다. Fig. 8(a)는 DISK3D 모듈을 구성하는 코드 중 일부인데, 불연속면 자료를 읽고 화면상에 가시화하기 전에 각각의 불연속면에 대한 투명도, 색상, 불연속면 경계의 삼차원 좌표 등의 속성을 부여한다. 투명도에 대한 속성을 부여하는 코드는 `glBlendFunc`로서 괄호안의 입력된 코드를 통하여 투명도가 결정된다. 색상에 대한 특성을 부여하는 코드는 `glColor4f`로 RGB값으로 색상을 부여할 수 있으며, 괄호 안에 입력된 4번째 값으로 색의 농도를 조절할 수 있다. `glVertex3f`는 불연속면 경계의 삼차원 좌표를 부여한다. Fig. 8(b)는 BOUNDARY 및 DISK3D 모듈을 사용하여 원판형 불연속면을 가시화한 예이다.

Hudson and La Pointe(1980)가 이차원적 불연속면 연결구조를 바탕으로 시도한 지하수 유동에 관한 연구는 불연속체 기반의 많은 관련 연구를 파생시켰다. Wang *et al.*(2002)은 삼차원 불연속면 연결구조를 바탕으로 임의의 불연속면이 다른 불연속면과 교차하는 경우 등가수리전도도를 갖는 선형의 등가파이프(equivalent pipes)를 구성한 후 지하수유동모델을 통하여 현장의 불연속면의 연결구조 시스템이 삼차원 수리전도도 텐서의 주방향성을 결정한다는 연구결과를 제시한 바 있다. 이 연구의 FNTWK3D 모듈은 Wang *et al.*(2002)과 Bang *et al.*(2003)의 알고리즘을 응용하여 불연속면의 연결구조 및 등가파이프를 산출하고 화면상에 구현할 수 있도록 작성되었다. FNTWK3D 모듈은 산정된 등가파이프의 시작점과 끝점으로 구성된 삼차원 좌표에 의해 화면에 출력되며, 선의 색상은 `glColor4f` 코드에 의해 RGB값으로 특성이 부여되고, `glLinewidth` 코드는 선의 두께를 결정한다. 이와 같은 코드의 일부가 Fig. 9(a)에 수록되었으며 Fig. 9(b)는 Fig. 7의 입력자료를 사용하여 등가파이프를 산정하고 가시화한 예이다.

CSECT 모듈은 BOUNDARY 모듈에 의한 해석 영역의 경계면이나 사용자가 지정하는 단면상에 나타나는 불연속면의 트레이스를 표현할 수 있다. 이 모듈은 사용자가 임의의 단면에 대한 모서리의 좌표들로 구성된 파일을 입력하면 지정된 단면에 교차하는 불연속면 트레이스의 좌표가 산정되고 화면에 출력되도록 설계되었다. Fig. 10은 CSECT 모듈에 의하여 작성된 절리

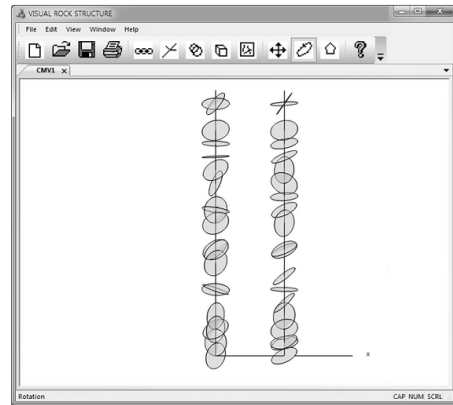


Fig. 11. An example output of the BDM module

연결구조의 단면도를 삼차원적으로 나타낸 예이다.

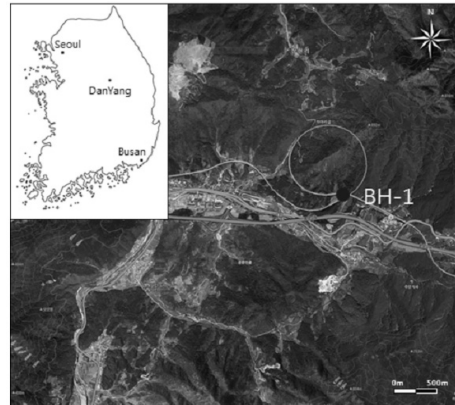
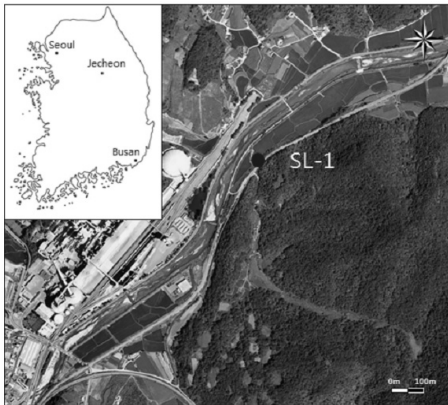
BDM 모듈은 시추공 상에서 나타나는 불연속면을 삼차원적으로 가시화하고 관리하는 기능을 담당한다. Fig. 11은 BDM 모듈을 사용하여 시추공 상에 존재하는 불연속면 자료를 가시화한 예이다.

이 연구에서 개발된 프로토타입의 소프트웨어는 상기 프로그램 모듈 외에 불연속면 분포 모델링 모듈이 추가될 예정이며, 또한 별도로 현재 개발 중인 삼차원 지층 모델링 소프트웨어에 통합되어 기술 및 가격 측면에서 경쟁력 있는 소프트웨어 패키지를 완성하는데 큰 역할을 담당할 것으로 기대된다.

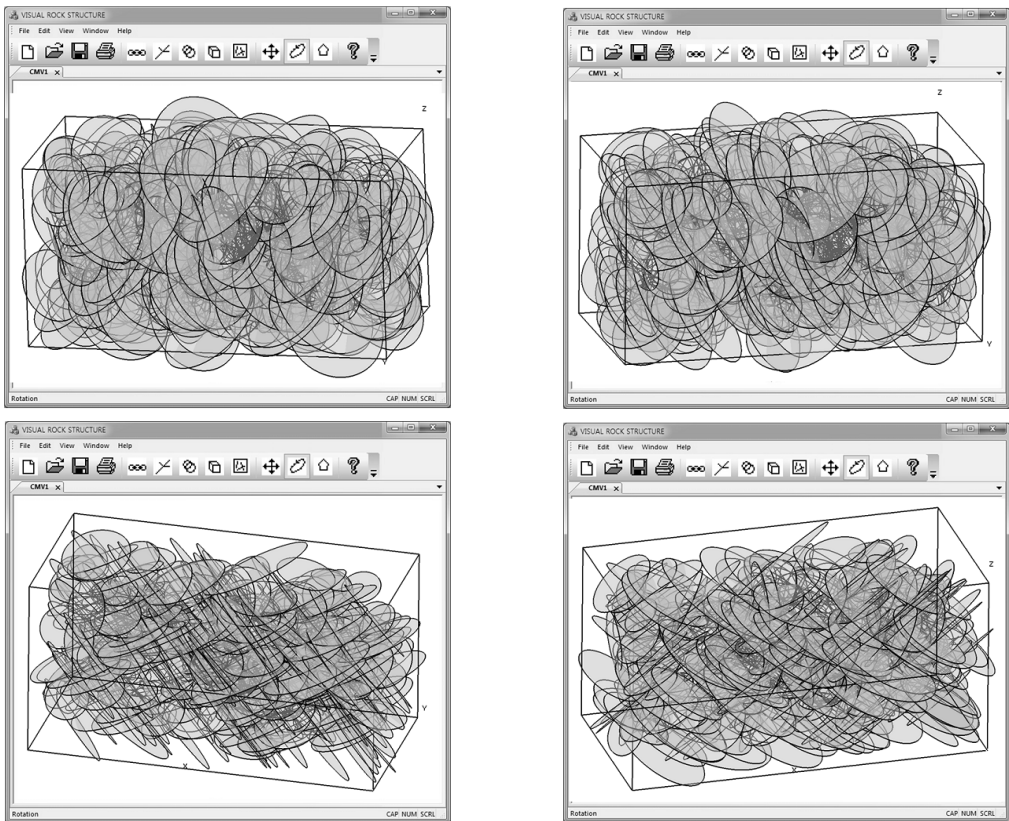
#### 4. 현장적용

이 연구에서 개발된 삼차원 불연속면 가시화 및 해석 소프트웨어 모듈의 기능 및 성능을 검토하기 위하여 제천 및 단양 지역의 탄산염암을 대상으로 현장적용이 수행되었다. 일반적으로 탄산염암은 퇴적상, 속성상 및 저류층에 대한 이해를 목적으로 다양한 연구가 진행되었으나, 탄산염암에 특징지어 균열/미시구조를 연구한 경우는 흔하지 않다. 세계적으로 Cambrian ~ Ordovician 시기의 탄산염암들은 현재 습곡-스러스트 벨트를 이루고 있는 경우가 많기 때문에, 탄산염암의 기하학적 형태를 유추하기 위해서는 습곡-스러스트 벨트를 이루는 단층, 층리, 절리 등의 다양한 불연속면에 대한 확고한 이해가 필요하다.

현장 절리자료 획득을 위하여 제천 지역에서는 스캔라인 조사법을, 단양지역에서는 시추공 영상촬영 기법을 사용하였다. Fig. 12 및 Fig. 13은 현장 조사를 수행한 위치이다. 제천지역에서 스캔라인 조사에 의한 절리 자료로부터 절리 네트워크 시스템을 생성하기 위하여



**Fig. 12.** Location of scanline SL-1 ( $37^{\circ}12'27''N$ ,  $128^{\circ}18'31''E$ ) **Fig. 13.** Location of borehole BH-1 ( $36^{\circ}55'08''N$ ,  $128^{\circ}22'20''E$ )



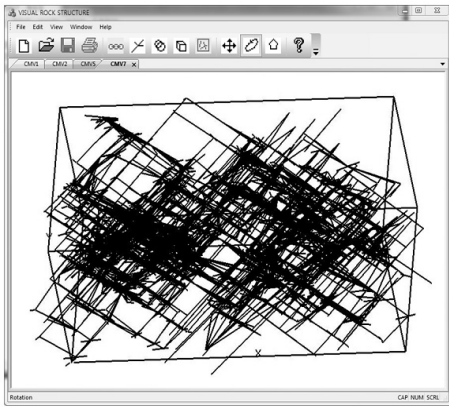
**Fig. 14.** Results obtained from SL-1 using the BOUNDARY and DISK3D modules show fracture network system for a  $10 \times 10 \times 20$  m cube from various standpoints

BOUNDARY, DISK3D, FNTWK3D, CSECT 모듈을 사용하였으며, 단양지역의 시추공 자료는 BDM모듈을 사용하여 개발된 소프트웨어의 적용성을 검토하였다.

총 20 m 길이의 스캔라인 SL-1에서 얻은 총 36개 불연속면에 대한 방향성, 간격 및 연장성의 통계분석 결과가 Table 1에 수록되어 있다. 불연속면의 방향성 분

**Table 1.** Summary of fracture geometry parameters estimated from field scanline survey at SL-1

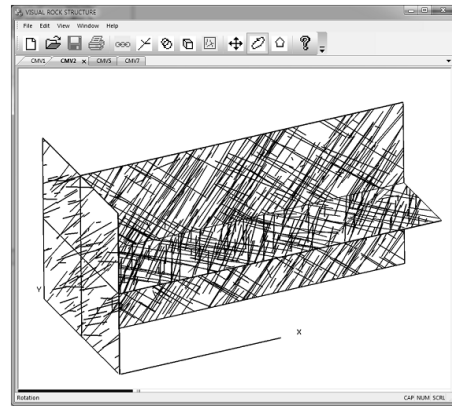
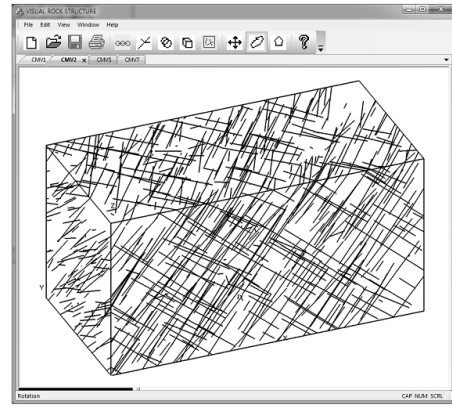
Scanline Length (m)	Set No.	No. of Fracture	Mean Orientation		Spacing (m)		Size (m)	
			dip direction (degrees)	dip (degrees)	mean	std.	mean	std.
20	1	14	025	69	1.12	1.02	2.48	1.40
	2	16	303	57	1.07	0.65	3.08	1.61
	3	6	048	46	0.78	0.43	3.06	0.61

**Fig. 15.** Result obtained from SL-1 using the FNTWK3D module

석을 위해서는 방향자료에 대하여 Mahtab and Yegulalp (1982, 1984)에 의해 제안된 클러스터링 알고리즘을 적용하여 불연속면 군을 구분하였다. 불연속면의 간격과 연장성의 통계분석에 대한 세부적인 절차는 Priest and Hudson(1976, 1981)을 참고할 수 있으며, Table 1에 수록된 현장 암반에 분포하는 불연속면에 대한 통계분석 결과를 기초로 몬테칼로 모사기법을 사용하여 불연속면 네트워크 시스템이 생성되었다.

제천 지역의 탄산염암 노두의 불연속면 자료로 생성한 불연속면 네트워크 시스템에 대하여 BOUNDARY 및 DISK3D 모듈로 가시화한 결과를 Fig. 14에 제시하였다. DISK3D 모듈은 대상암반에 대한 불연속면의 방향성, 크기, 빈도에 관한 정보를 다양한 시각에서 검토할 수 있으며, 원관형 불연속면을 정방향으로 설정하여 출력하면 암반의 강도 및 변형성과 관련된 불연속체 기반의 수치해석을 위한 입력 자료를 구성하는 데에 활용할 수 있다.

Fig. 15는 FNTWK3D 모듈을 사용하여 불연속면 네트워크 시스템에 의하여 형성될 수 있는 등가파이프를 산정하고 삼차원적으로 구현한 도면이다. 여기서 산정된 모든 등가파이프의 위치 좌표는 ASCII 파일로 저장

**Fig. 16.** Results obtained from SL-1 using the CSECT module

되며, 이는 암반에 대한 지하수유동 채널에 대한 정보를 제공함으로써 암반의 수리특성에 관한 연구에 있어서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

Fig. 16은 CSECT 모듈을 사용하여 해석 영역에 대한 단면도를 작성한 결과이다. 이와 같은 기능은 암반의 불연속면 구조의 효과적인 이해를 위한 펜스다이어그램을 제공할 수 있으며 사용자가 원하는 이차원 단면상에 분포하는 불연속면의 기하학적 속성을 출력하여 이차원 수치해석이나 암반 굴착에 따른 키블록 해석에



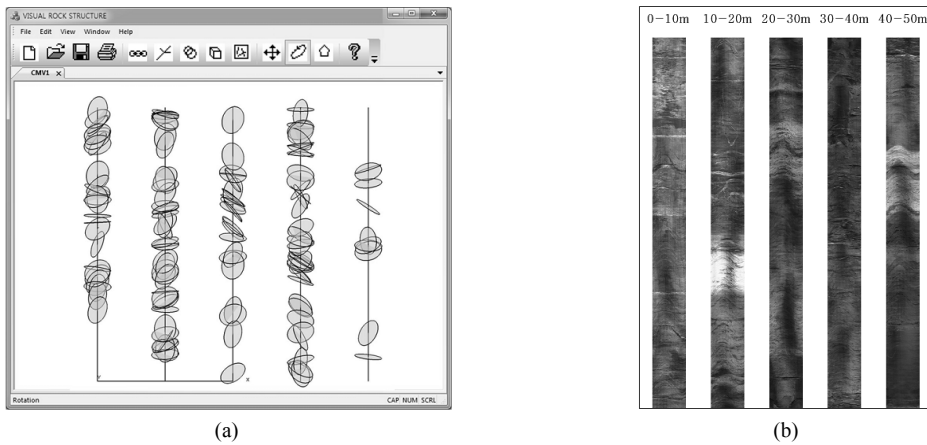


Fig. 17. (a) Result obtained from BH-1 using the BDM module and (b) corresponding borehole image

유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 17은 BDM 모듈을 사용하여 단양 지역의 시추공 BH-1에서 얻은 불연속면 자료를 도시한 결과인데, 여기서 불연속면의 크기는 사용자가 필요에 따라 설정할 수 있다. BDM 모듈은 시추공의 불연속면 자료를 겹층 이미지와 함께 삼차원적으로 가시화할 수 있을 뿐만 아니라 현장 제원에 따라 불연속면의 크기를 가정하여 설정하면 굴착 이전에 사면안정 해석을 수행하는 데에 유용하게 사용될 수 있다.

## 5. 결론

이 연구는 사용자 중심적 GUI (graphical user interface) 기반의 불연속면 연결구조에 대한 해석 및 가시화를 위한 소프트웨어 모듈을 개발하였다. 소프트웨어 모듈은 절리성 암반에서 불연속면의 효과적인 삼차원적 표현을 위하여 C++언어 기반의 MFC 및 OpenGL 라이브러리를 응용하여 Microsoft Visual Studio 상에서 제작되었으며 BOUNDARY, DISK3D, FNTWK3D, CSECT, BDM 등의 모듈을 포함한다.

BOUNDARY 모듈은 터널, 사면, 해석 영역 등 다양한 형태의 현장 제원을 도면으로 제공하는 기능을 수행한다. DISK3D 모듈은 암반 불연속면의 방향성 및 크기 분포와 빈도에 대한 사용자의 직관을 다양한 방향에서 제공할 수 있으며 절리성 암반의 강도 및 변형성과 관련된 불연속계 기반의 수치해석을 위한 입력 자료를 구성하는 데에 활용할 수 있다. FNTWK3D 모듈은 불연속면 네트워크 시스템에 의해 형성 가능한 등가파이프에 대한 해석 결과를 도출하는데, 이는 유체의 유동 특성에 관한 연구에 있어서 활용도가 높을 수 있을 것

로 판단된다. CSECT 모듈은 사용자가 지정한 위치의 이차원 단면상에 트레이스 형태로 가시화하여 크기 및 방향 등의 단면의 제원에 따른 암반의 구조적 특성을 표현할 수 있으며, 이는 암반 굴착에 의한 삼차원 �블록 해석 또는 파괴 양상과 규모를 파악하는데 이용할 수 있을 것으로 생각된다. BDM 모듈은 시추공 상의 불연속면을 가시화할 수 있으며, 가시화된 시추공 자료를 이용하여 효과적인 시추공 데이터 관리 및 차후 단계의 연구를 수행하는 데에 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 “상용화를 위한 탄산염암 비투멘 및 중질오일 기술 개발(과제번호 : 2011201030006B)” 과제의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. 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*, Vol. 13, pp. 52-63.
2. Hudson, J. and La Pointe, 1980, Printed circuits for studying rock mass permeability, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, pp. 297-301.
3. Ju, K. S., 2000, A study on the groundwater flow and solute transport in discontinuous rock mass using fracture network analysis: an estimation of equivalent permeability on discontinuous rock mass, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 10, pp. 378-386.
4. Kim, Y. I., 1999, Modeling the water-Block Interaction

- with discontinuous deformation analysis method, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 9, pp. 149-157.
5. Kim, S. W. and Shin, W. S., 2003, Visual C++ MFC programming, Hanbit Media, Inc., 736p.
  6. 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, Vol. 22, pp. 313-330.
  7. Mahtab, M. A. and T. M. Yegulalp, T. M., 1982, Rejection criterion for definition of clusters in orientation data, Proc. of 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 116-123.
  8. Mahtab, M. A. and T. M. Yegulalp, T. M., 1984, A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics, Proc. of the 25th U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 495-502.
  9. Noh, Y. H., Um, J. G., 2012, Methods of discontinuity network visualization in 3-D, The Journal of Engineering Geology, Vol. 22, pp. 449-458.
  10. Priest, S. D. and J. Hudson, 1976, Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 13, pp. 135-148.
  11. Priest, S. D. and J. Hudson, 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 183-197.
  12. 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, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 39, pp. 887-904.

---

### 노영환



2011년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사  
2013년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학석사

Tel: 051-629-6559  
E-mail: nyh3224@nate.com  
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 박사과정

### 엄정기



1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사  
1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사  
1997년 University of Arizona 자원지질공학과 공학박사

Tel: 051-629-6559  
E-mail: jum@pknu.ac.kr  
현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수

---

### 최요순



2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사  
2009년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 공학박사  
2010년 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과 Post-Doc

Tel: 051-629-6562  
E-mail: energy@pknu.ac.kr  
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 조교수

### 황석연



1983년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사  
1985년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사  
1993년 University of Tulsa 지구과학과 이학박사

Tel: 031-380-2602  
E-mail: sukyeon.hwang@knoc.co.kr  
현재 한국석유공사 석유기술연구원 팀장

---