

원유 및 가스 지하저장시설에서 불연속면을 고려한 수리-역학적 상호작용에 관한 연구

장현익¹⁾, 이정인²⁾

The Hydro-mechanical Analysis of Jointed Rock Mass Around the Underground Oil & Gas Storage Cavern

Hyun-Ick Jang and Chung-In Lee

Abstract. In this study, three-dimensional block generation program was developed using the discontinuities input data for three-dimensional mechanical and hydro-mechanical analysis. Shi's two dimensional theory and program was extended to those of three-dimension and the deformations of blocks were calculated. The two-dimensional hydro-mechanical theory of DDA was also extended to three-dimensional theory and coupling deformation of the underground cavern was analyzed considering discontinuities.

KeyWords: Three-dimension, DDA, Coupling

초 록. 본 연구에서는 삼차원 역학적 해석과 수리-역학 상호작용 해석에 동시에 적용할 수 있도록 불연속면 자료를 이용하여 삼차원 블록을 만드는 프로그램을 개발하였다. 삼차원 블록의 역학적 해석을 위해 Shi가 개발한 이차원 불연속변형 해석의 이론을 삼차원으로 확장하여 프로그램을 개발하고 실제 블록에 적용하여 변위를 계산하였다. 수리해석과 수리-역학적 상호작용 해석을 위해 기존의 이차원 불연속변형 해석의 수리-역학 상호작용 모델링 연구를 삼차원으로 확장하여 삼차원 불연속면을 고려한 수리-역학 상호작용해석을 실시하였다.

핵심어: 삼차원, 상호작용, 불연속 변형 해석

1. 서 론

지속적인 경제성장에 따른 에너지의 안정적인 공급을 위해서 국내에서도 이미 세계적 규모의 원유 및 가스 지하비축 시설이 건설 또는 운영 중에 있으며 이미 알려진 바와 같이 지상시설에 비해서 지하비축시설이 가진 여러 가지 장점으로 인해서 지속적인 추가건설이 예정되어 있다. 원유 및 가스 지하저장 지하비축시설은 공동 주위 암반의 수압을 저장공동의 내부압력 이상으로 유지시켜서 저장물의 유출을 억제하는 수력학적 저장원리를 적용하고 있다. 이를 위해서는 우선 공동의 굴착으로 인한 공동 주위의 암반의 투수계수 변화를 규명하는 것이 필요하다. 공동의 굴착으로 인한 공동 주

위 암반 투수계수에 영향을 미치는 중요한 요소는 발파에 의한 균열의 생성과 공동 주위의 응력재배치현상이라고 할 수 있는데 이중 후자가 비교적 넓은 범위에서 투수계수의 변화를 일으키는 요소이다(장근무, 1996). 응력재배치에 의한 투수계수의 변화로 인하여 지하수의 유동양상이 변하고, 지하수 유동 양상의 변화로 인한 압력변화로 암반의 응력이 변하는 수리-역학적 상호 작용이 발생한다. 그런데 지하수의 흐름은 대부분 불연속면을 통하여 이루어지므로 수리-역학적 상호작용을 해석하기 위해서는 반드시 암반내 불연속면의 영향을 고려하여야 한다.

공동 주위의 지하수 유동모델 해석은 암반을 등가다공성 매체, 이중공극 매체, 불연속면 연결망을 모델화하는 세 가지 유형으로 분류할 수 있다. 암반을 등가다공성매체로 가정하는 해석이 가장 널리 행해지는 방법인데 이 방법은 넓은 지역을 대상으로 하는 해석에 적합하며 전반적인 지하수 흐름의 파악에 유용하게 적용될

¹⁾서울대학교 공학연구소 연수연구원

²⁾서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수

접수일: 2002년 11월 6일

심사 완료일: 2002년 12월 20일

수 있다. 이중공극모델은 암반을 불연속면과 암석블록의 두 매체로 모델화하는 해석으로 균열의 발달 정도와 분포 형태가 매우 복잡해서 개개 불연속면의 기하학적, 수리적 특성을 고려하기 어려운 암반에 적용성이 크다. 불연속면 연결망 모델은 결정질 암반의 지하수 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 불연속면이라는 개념에 근거하여 불연속면을 발생시키고 그 불연속면을 통한 지하수유동해석을 실시하는 것이다. 본 연구에 사용하게 될 불연속면 연결망 모델은 1980년대부터 활발히 연구되기 시작하였으며 이차원해석(장현익, 1996, Samaniego, 1985)이 많고 최근에는 하드웨어의 제한성에도 불구하고 삼차원해석(Chiles, 1988)이 늘어가는 추세이다.

본 연구에서 개발한 암반 블록의 삼차원 역학적 해석 방법인 불연속변형해석법(DDA)은 Shi & Goodman (1984)에 의해 처음 제시된 방법으로 처음에는 역해석 방법이었으나 Shi(1988)가 순해석으로 확장하여 제시하였으며 그 이후 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어졌는데 이것을 분류하면 이론과 프로그램의 결합을 보완하는 연구와 이론의 현장적용에 관한 연구로 나눌 수 있으며 두 가지를 병행하면서 지금까지 발전해 왔다. 삼차원 불연속 변형 해석(DDA)의 자세한 내용은 장현익(2002)의 논문에 나타나 있다.

암반에서의 수리-역학적 상호작용에 대한 연구는 불연속면을 고려하지 않은 연구가 대부분이며 연구의 주된 경향은 실험을 통해 경험적인 관계식을 규명하는 것과 암석을 이상적인 다공질 매체로 가정하고 이론적인 상호작용관계식을 구하여 이것을 수치해석에 이용하는 것이다. 주로 토질역학에서의 압밀문제를 다루는데 사용되었는데 암반에의 적용은 Sato & Kamenura(1985)에 의하여 토질과 다른 수리-역학적 상호작용을 고려한 연구가 이루어졌다. 국내에서도 지하 원유저장 공동 주위 암반의 변형거동 특성에 따른 지하수 유동해석에 관한 연구(장근무, 1995)와 탄성 암반에서의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 연구(안형준, 1996)가 이루어진 바 있다. 불연속면을 고려한 상호작용에 관한 연구는 Noorishad & Witherspoon (1982)에 의하여 행해졌고 최근에는 여러 연구자(Wei, 1992; Guvanasen & Chan, 1991)에 의해서 주로 방사성 폐기물 처분장에 대한 연구를 통해 이루어지고 있다. 그러나 삼차원 불연속면에서의 상호작용에 관한 연구는 전 세계적으로도 적은 실정이며 국내에서의 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 입력된 불연속면 자료를 이용하여 삼차원 블록을 만드는 프로그램을 개발하였다. 삼차원 블록의 역학적 해석을 위해 Shi가 개발한 이차원 불연속 변형 해석의 이론을 삼차원으로 확장하여 프로그램을

개발(장현익, 2002)하고 실제 블록에 적용하여 마찰각에 따른 변위를 계산하였다. 수리해석과 수리-역학적 상호작용 해석을 위해 이차원 불연속변형 해석의 수리-역학 상호작용 모델링 연구(김용일, 1999, Jing, 2001)를 삼차원으로 확장하여 삼차원 불연속면을 고려한 수리-역학 상호작용해석을 실시하였다.

2. 삼차원 블록생성

2.1 블록 만들기 알고리즘과 예제

불연속 변형 해석을 위해서는 블록들의 형상에 대한 자료가 필요하다. 보통 불연속면은 원판, 직사각형 등으로 가정하는데 본 연구에서는 불연속면을 원판으로 가정하였으며 불연속면에 대한 입력자료는 중심점의 좌표, 반지름, 수직벡터가 된다. 이 절에서는 불연속면 입력자료를 이용하여 각 불연속면들의 위치관계에 따라 정해지는 블록의 생성과정에 대하여 설명하였다.

불연속 변형 해석 프로그램에서 사용되는 블록 형상에 관한 입력자료는 각 블록의 꼭지점, 블록의 모서리, 블록의 면을 이루는 삼각형이다. 꼭지점, 모서리, 삼각형은 불연속면이 다른 불연속면을 절단하여 지나갈 때 만들어지는데 하나의 불연속면은 블록의 면을 형성할 수 있고 두 개의 불연속면이 만나는 선은 블록의 모서리를 형성할 수 있으며 세 개의 불연속면이 만나는 점은 블록의 꼭지점을 형성할 수 있다. 불연속면의 방향, 크기 자료로부터 삼차원 블록을 생성하는 과정은 Fig.1과 같다.

-불연속면 자료 입력

삼차원 블록을 만들기 위해 필요한 입력변수는 각 불연속면의 중심점, 방향, 반지름이며 입력자료를 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 8개의 불연속면을 볼 수 있

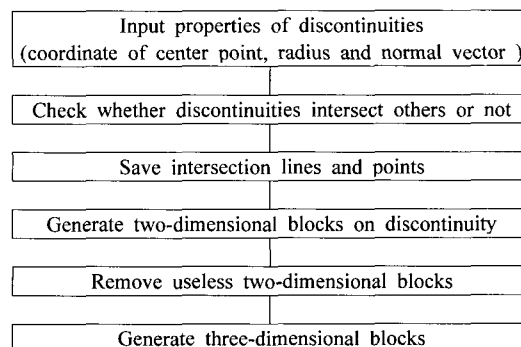


Fig. 1. Flow chart of three-dimensional block generation process.

고 x 축에 직각으로 있는 두 개의 불연속면이 (1)과 (2), y 축에 직각인 두 개의 불연속면이 (3), (4), z 축에 직각인 두 개의 불연속면이 (5), (6)이며 그림에서 마주보고 있는 불연속면이 (7), 나머지가 (8)이다. 불연속면의 반지름은 각 모서리의 길이가 10인 블록을 만들기에 충분하도록 15와 18로 정하였다. (7), (8) 평면을 (경사, 경사방향)으로 나타내면 각각 (40, 130), (60, 220)이다.

-불연속면의 교차 여부 확인

불연속면이 블록을 생성하기 위해서는 서로 만나서 교차선이 만들어져야 한다. 두 개의 불연속면이 만나면 하나의 선분이 만들어지고 세 개의 불연속면이 만나면 하나의 점을 생성한다. 두 개의 불연속면이 만날 가능성이 있는 경우는 두 불연속면의 중심간 거리가 두 불연속면의 반지름의 합보다 작을 경우인데 이 경우에도 모두 만나는 것은 아니다. 평행하면 만나지 않고 평행하지 않더라도 만나서 이루는 선분이 일정한 반지름을 가지는 두 개의 불연속면상에 존재할 경우는 두 불연속면의 위치관계에 따라 달라진다.

-만나는 선분과 점 저장

불연속면으로부터 삼차원 블록을 생성하기 위해서는 두 개 이상의 불연속면이 만나서 이루는 교차 선분과 점을 계산하여 저장하여야 한다.

Fig. 3에서 3개의 불연속면이 만나서 한 점을 생성하는 경우를 볼 수 있다. Fig. 2의 (1), (3), (5) 불연속면이 만나서 한 점 A를 생성하는데 불연속면 (1)은 x 축, (3)은 y 축, (5)는 z 축에 수직인 평면이고 중심의 좌표가 각각 (5, 0, 0), (0, 5, 0), (0, 0, 5)이므로 식 (3.2)에 대입하면 만나는 점 A의 좌표는 (5, 5, 5)로 계산된다. Fig. 3과 같이 이 점이 세 불연속면 모두의 내부에 존재하므로 이 점은 세 개의 불연속면이 만나는 한 점이 된다. 세 불연속면이 만나는 점을 구한 다음 단계는 그 점

이 속한 평면과 선분을 찾는 과정이다. 이것을 이용해서 평면상에서의 이차원 블록을 만들기 때문이다. Table 1은 Fig. 2의 예에서 두 개의 평면이 만나면서 생긴 선분에 놓여있는 점의 개수를 기록한 것이다. 그 점들의 좌표는 따로 기록해 두어야 한다. Table 1의 좌측과 위쪽이 평면 번호를 나타내고 행과 열에 해당하는 평면이 만나서 나타내는 수가 두 개의 평면이 만나는 선분에 존재하는 점의 개수이다. Table 1을 보면 (1)번 평면과 (3)번 평면이 만나는 선분에는 4개의 점이 생긴다는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 점 A는 평면 (1)과 (3)이 만나서 이루는 선분 위의 점 4개 중에 하나이며 그 중에서 평면 (5)가 그 선분과 만나는 점이 된다.

-불연속면상에서 이차원 블록 생성

삼차원의 블록은 다각형의 집합이며 그 면은 삼차원 블록을 둘러싸고 있는 불연속면 위에 존재하는 다각형이다. 그러므로 불연속면으로부터 삼차원 블록을 만들기 위해서는 여러 개의 불연속면이 만나서 생성하는 불연속면상의 다각형을 먼저 찾아야 한다. 이 다각형을 불연속면상에 존재하므로 편의상 이차원 블록이라고

Table 1. Number of points on intersection line made by two planes in Fig. 2.

Plane number	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	4	4	4	4	5	5
2	0	0	3	4	4	2	4	3
3	4	3	0	0	4	4	5	4
4	4	4	0	0	4	3	3	4
5	4	4	4	4	0	0	5	5
6	4	2	4	3	0	0	3	4
7	5	4	5	3	5	3	0	5
8	5	3	4	4	5	4	5	0

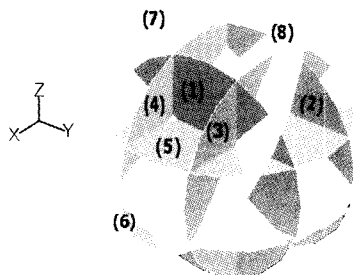


Fig. 2. Discontinuities for three-dimensional block generation.

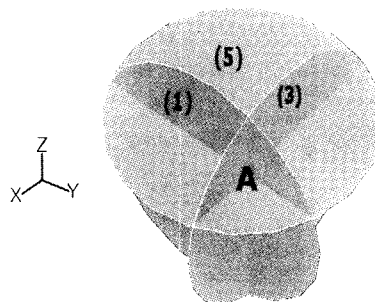


Fig. 3. Intersection point A made by planes (1), (3) and (5).

부르기로 한다. Table 1과 같이 (1)번 평면은 (3), (4), (5), (6), (7), (8)번 평면과 만나서 선분을 만들고 그 선분들이 만나서 점을 만든다.

불연속면상의 점과 선분을 이용하여 이차원 블록을 만드는데 Shi(1988)의 방법을 사용하였다. 이차원 블록을 만드는 단계는 먼저 각 점이 만나는 선분과 이웃하는 점을 기록한다. 그 다음 초기 출발점을 임의로 정하고 다른 블록을 생성하지 않고 이웃하는 점으로 이동한다. 그 다음으로 이동할 점은 이동 전과 이동 후의 점을 잇는 선분을 기준으로 반시계 방향의 각도가 가장 작은 점이다. 이 과정을 계속 반복하여 처음 출발점으로 돌아오면 하나의 블록이 생성된다.

예를 들면 Fig. 4의 2번 점을 출발점으로 하고 3번 점으로 이동하였을 때 3번 점은 2번 점을 제외한 1번, 5번 점과 이웃하고 2번과 3번 점을 잇는 직선과 1, 5번 점과 이루는 반시계방향 각도는 각각 $270^\circ, 90^\circ$ 이다. 그러므로 5번 점으로 이동한다. 그 다음 점은 3번과 5번 점을 잇는 직선과 5번의 이웃점 4번, 6번, 10번 점과 이루는 각도(각각 $270^\circ, 180^\circ, 90^\circ$)중 최소인 10번 점으로 이동한다. 계속해서 2번 점에 이를 때까지 계속한다.

2-3-5-10-2번 점을 잇는 블록이 만들어진 다음 이것을 저장하고 다시 2번 점을 출발하여 3번을 제외한 점으로 이동한 다음 앞의 과정을 반복하여 다른 블록을 만들어서 2번에 이웃하는 점 중 블록을 만들지 않은 점이 없을 때까지 계속하여 블록을 찾는다.

2번의 이웃점들이 모두 블록을 생성하면 이웃하는 점과 블록을 생성하지 않은 다른 점으로 이동하여 앞의 과정을 계속 반복한다. 모든 점들이 이웃점과 블록을 생성하면 모든 블록이 만들어진 것이다.

-블록을 만들지 않는 면 제거

불연속면 상의 이차원 블록을 모두 만든 다음의 과정

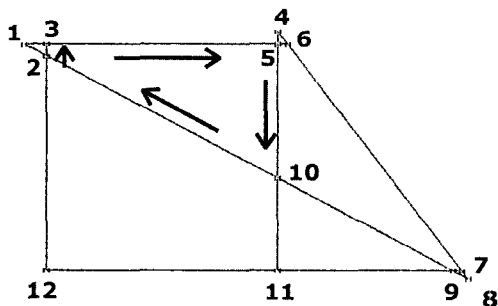


Fig. 4. An example showing the generation of two-dimensional blocks.

은 이차원 블록 중에서 삼차원 블록을 만들 때 사용되지 않는 면을 제거하는 것이다. 이 면은 모든 이차원의 모서리 중에서 자신의 블록 이외의 이차원 블록에서 같은 양끝점을 가지는 모서리가 없는 블록이다. 정육면체를 생각해 보면 하나의 면은 다른 면과 이웃하면서 하나의 모서리를 공유하고 있다. 이웃하는 면이 없다면 그 모서리는 다른 모든 면에서 공통되는 모서리를 가지지 못하므로 삼차원 블록이 형성되지 않게 된다.

-삼차원 블록 완성

접촉을 찾고 블록의 무게중심을 구하는 등 여러 가지 계산의 편의를 위해서 삼차원 블록의 면은 점들의 일정한 배열 방향을 가진 삼각형으로 이루어져야 한다. 삼각형이 반시계방향으로 배열되어있는 것을 양의 삼각형, 반대방향으로 음의 삼각형이라고 정의하면 블록을 구성하는 삼각형은 외부에서 볼 때 양의 삼각형들로 이루어져 있다. 그러므로 블록을 만들지 않는 면을 제거한 다음의 과정은 이차원 블록을 삼각형으로 나누고 모든 삼각형의 반대방향 삼각형을 만들어서 모든 삼각형이 음과 양의 방향을 가지게 만든다. 블록은 양의 삼각형들로만 이루어져 있으므로 블록을 구성하는 양의 삼각형의 집합을 만들면 블록이 완성된다. 이차원 블록을 만들 때와 같은 방법으로 모서리를 공유하는 삼각형과 두 삼각형사이의 반시계방향 각도를 모두 기록한다. 블록을 이루는 삼각형은 모서리를 공유하는 삼각형 중 최소각도를 가지는 삼각형들로 이루어져 있으므로 그것을 모두 찾아가는 과정을 계속 반복하면 삼차원 블록이 완성된다.

Fig. 5를 이용해서 설명하면, 삼차원 블록을 만들기 전 양의 삼각형과 음의 삼각형을 동시에 가지고 있는 4개의 삼각형을 보여준다. 양의 삼각형은 1-2-3, 1-3-4, 음의 삼각형은 1-3-2, 1-4-3이다. 4개의 삼각형이 공유

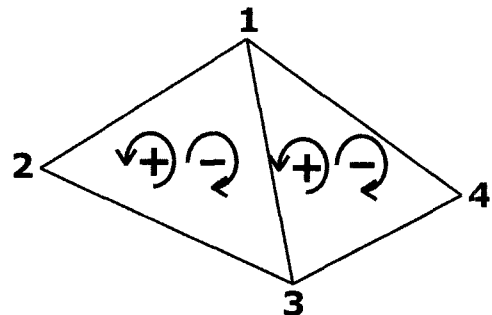


Fig. 5. Plus (+) triangle and minus (-) triangle in three-dimensional block generation.

하고 있는 모서리는 1-3, 3-1이다. 삼차원 블록을 만드는 과정은 먼저 양의 1-2-3삼각형을 출발점으로 하고 1-2-3삼각형의 3-1모서리를 만나는 양의 삼각형은 그림에서와 같이 1-3-4이다. 그러므로 3-1모서리와 반대방향의 모서리 1-3을 가지는 삼각형을 찾으면 된다. 1-3-2도 1-3모서리를 가지지만 반대 면의 삼각형은 같은 블록이 될 수 없으므로 제외한다. 그러므로 1-2-3삼각형은 1-3-4와 같은 블록을 이루게 된다. 만약 다른 삼각형이 1-3모서리를 공유한다면 삼각형 1-2-3을 기준으로 했을 때 반시계방향각도를 계산하여 최소각을 가지는 삼각형을 택한다. 삼각형 1-2-3에서 3-1모서리를 공유하는 양의 삼각형을 찾았으므로 표시하고 나머지 모서리를 가지고 공유하는 모서리를 가지는 양의 삼각형을 모두 찾을 때까지 반복하여 삼차원 블록을 찾는다.

Fig. 6 (a)는 모든 삼차원 블록을 찾은 후의 모습이다. Fig. 6 (b)는 Fig. 6 (a)을 z축을 중심으로 반시계방향으로 100°를 회전한 후의 모습이다.

로 100°를 회전한 후의 모습이다. 모두 15개의 블록을 찾았다. 남은 최종 과정은 경계범위를 넘어가는 블록을 제외시키는 것이다. 구하고자 하는 블록은 x,y,z축으로 각각 (-5, 5), (-5, 5), (-5, 5)의 범위를 가지는 블록이므로 각 블록의 무게중심을 계산하여 무게중심의 좌표가 범위에서 벗어나면 제외한다. Fig. 7 (a)는 경계범위를 벗어나는 블록을 제외시킨 후 삼차원 블록의 모습이다. Fig. 7 (b)는 Fig. 7 (a)를 z축을 중심으로 반시계방향으로 100°를 회전한 후의 모습이다.

3. 역학적 해석과 수리적 해석 이론 개발

3.1 역학적 해석 이론

큰 변위(displacement)와 변형(deformation)은 작은 변위와 변형의 누적이다. 각 단계 안에서는 모든 점에서의 변위는 작으며 변위함수는 다음과 같이 단순화할 수 있다.

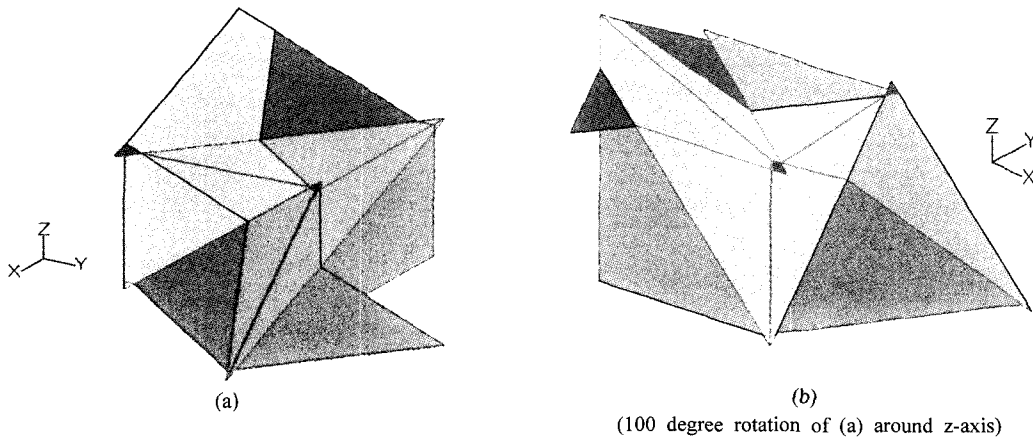


Fig. 6. Generation of three-dimensional blocks before deleting blocks over the outer boundary

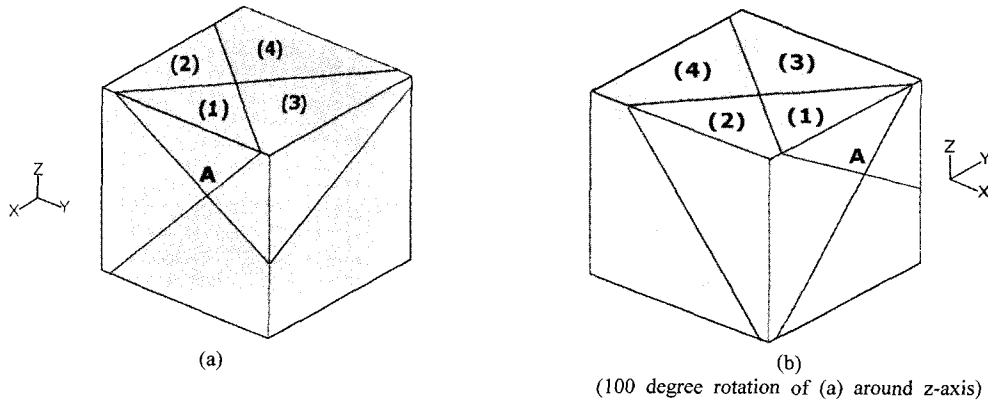


Fig. 7. Generation of three-dimensional blocks after deleting blocks over the outer boundary.

각 블록은 일정한 응력과 일정 변형률을 가지고 있다고 가정하고 블록의 임의의 점(x,y,z)의 변위 (u,v,w)는 12개의 변위 변수로 표시할 수 있다.

$$(u_0, v_0, w_0, r_1, r_2, r_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}) \quad (1)$$

u_0, v_0, w_0 은 강체의 평행이동, r_1, r_2, r_3 은 무게중심에 대한 회전각(라디안), $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 는 블록의 축 변형률과 전단변형률이다. 점 (x, y, z)의 변위 (u, v, w)는 $(u_0, v_0, w_0, r_1, r_2, r_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ 에 의해 발생된 변위들의 합이다. 이를 각 변수의 1차원 근사에 의해 표시하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = [T_i][D_i]$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -(y-z) & 0 & (z-z_0) & (x-x_0) & 0 & 0 & \frac{(y-z_0)}{2} & 0 & \frac{(x-z_0)}{2} \\ 0 & 1 & 0 & (x-z) & -(z-z_0) & 0 & 0 & (y-y_0) & 0 & \frac{(x-z_0)}{2} & \frac{(z-z_0)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & (y-y_0) & -(x-x_0) & 0 & 0 & (z-z_0) & 0 & \frac{(y-z_0)}{2} & \frac{(x-z_0)}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_7 \\ D_8 \\ D_9 \\ D_{10} \\ D_{11} \\ D_{12} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $[T_i]$ 는 일차원 근사 함수이고 $[D_i]$ 는 변위이며 좌표 (x_0, y_0, z_0) 는 블록의 무게중심이다.

각각의 블록은 연결되어 있고 블록간의 접촉과 블록의 변위제약에 의해서 블록계를 형성한다. n개의 블록이 있다고 가정하면 평형을 이루는 연립방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

각 블록이 12개의 자유도를 가지고 있기 때문에 식(3) 행렬의 각 계수인 K_{ij} 요소는 12x12인 행렬이다. F_i, D_i 는 12x1 행렬이며 F_i 는 블록 i에 분포하는 하중, D_i 는 블록 i의 변형변수 ($u_0, v_0, w_0, r_1, r_2, r_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$)이다. 부행렬 $[K_{ij}]$ (식(3)의 대각선행렬)는 블록 i의 역학적 성질과 측정된 변위에 의해 정해지고 $[K_{ij}] (i \neq j)$ 블록 i와 j의 접촉으로 정의된다.

이 평형방정식은 힘과 응력에 의해 발생하는 전체 포텐셜에너지 Π 를 최소화시킴으로써 얻어진다. 식 (3)의 i번째 행은 12개의 선형식으로 이루어져 있다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_r} = 0, \quad r=1, \dots, 12 \quad (4)$$

여기서 d_r 는 i블록의 변형변수이다. i블록식에 대하여

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_0} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial v_0} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial w_0} = 0 \quad (5)$$

식 (5)는 x,y,z 방향으로 블록 i에 작용하는 모든 하중과 접촉력의 평형을 나타낸다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial r_1} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial r_2} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial r_3} = 0 \quad (6)$$

식 (6)은 블록 i에 작용하는 모든 하중과 접촉력의 모멘트에 대한 평형을 나타낸다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \epsilon_x} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial \epsilon_y} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial \epsilon_z} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{xy}} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{yz}} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial \gamma_{zx}} = 0$$

식 (7)은 x,y,z를 따라 블록에 작용하는 모든 외력과 외부 응력의 평형을 나타낸다.

전체 포텐셜에너지 Π 는 모든 각 응력과 힘에 의해 정해지는 포텐셜에너지원의 합이다. 포텐셜에너지와 그것의 미분은 블록에 대해서 각각 계산된다.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_r \partial d_{sj}} = 0, \quad r, s=1, \dots, 12 \quad (8)$$

식 (8)은 변수 d_r 에 대한 평형방정식 식 (3)의 미지수 d_{sj} 의 계수이다. 그래서 (8)의 모든 항은 12x12 행렬을 이루고 이것은 전체행렬인 $[K]$ 의 부행렬이 된다. 식 (8)을 보면 $[K]$ 의 계수행렬이 대칭이라는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\partial \Pi(0)}{\partial d_r} = 0, \quad r=1, \dots, 12 \quad (9)$$

식 (9)는 식 (4)의 자유항을 식의 오른쪽으로 이항한 항이다. 그러므로 식 (9)는 12x1의 행렬을 이루고 행렬 $[F_i]$ 에 더해진다.

삼차원 불연속 변형 해석에 대한 자세한 설명은 장현익(2002)에 자세히 설명되어 있으므로 이 논문에서는 생략한다.

3.2 수리해석 이론

Fig. 8과 같이 수리-역학 상호작용 모델은 불연속 변형해석을 통한 역학적 해석과 불연속면 사이의 유동 계

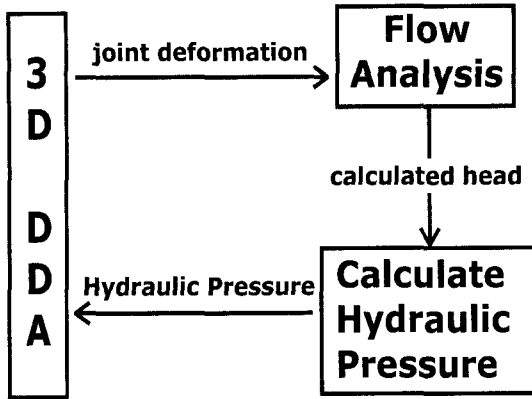


Fig. 8. Concept of hydro-mechanical coupling.

산을 위한 수리 해석으로 이루어져 있다. 불연속면의 방향, 크기, 경계조건 등 불연속 변형해석에 사용된 입력자료가 수리해석의 입력자료로 사용된다. 수리해석의 결과로 계산된 압력의 변화는 불연속변형해석의 역학적 해석에 다시 사용되어 블록의 변형에 기여하게 된다. 불연속변형해석의 블록변형은 수리해석의 입력변수를 변화시켜 수리적 압력을 변화시키고 반대로 수리해석의 압력변화는 불연속변형해석의 블록변형에 영향을 미치는 방법으로 상호작용을 해석하게 된다.

Bernoulli 이론에 의하면 마찰이 없고 비압축인 이상 유동의 경우, 압력수두 $h_p = p/\gamma_w$, 위치수두 $h_e = z$, 속도수두 $h_v = \frac{v^2}{2g}$ 의 합이 모든 점에서 일정하다.

$$\frac{p}{\gamma_w} + z + \frac{v^2}{2g} = H + h_v = const = H_t \quad (10)$$

여기서 p: 압력, z: 바닥에서의 거리, v: 평균 속도, H: 압력수두와 위치수두의 합, H_t : 전수두

간극 b, 길이 L, 폭 t인 사각형 단일 불연속면의 정상 유동에서 전수두 손실은 불연속면과 유체의 마찰에 의해 발생한다. Louis(1969)에 의하면 평균속도 v와 압력수두의 증가량 $i = \Delta H/L$, 전수두 손실의 증가량, $\Delta H/L$ 과 같다)은 난류가 없는 층류를 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$v = Ki = K \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \quad (11)$$

식(11)에서 ΔH 는 압력수두의 손실이다. 수리전도도 K는 $\frac{Kb^3}{12\nu}$ (g : 중력가속도, ν : 동점성도)이며 각 수리 영역에 대해 유량 Q는 다음과 같다.

$$Q = vbt = Kbt \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \quad (12)$$

식 (12)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$Q = T\Delta H, \quad T = \frac{Kbt}{L} \quad (13)$$

식 (13)에서 T는 불연속면 투과율(Transmissivity) 이라 한다.

삼차원 블록의 면이 Fig. 9와 같이 모두 직사각형 형태로 이루어져 있고 길이가 L_i , 평균 간극이 b_i , 폭이 t_i 인 단일 평판요소 i에서의 유동을 행렬 형태로 표시하면 k 일 때 식 (14)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} Q_k^i \\ Q_j^i \end{Bmatrix} = T^i \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_k^i \\ H_j^i \end{Bmatrix} \quad (14)$$

블록들이 많이 존재하는 블록 시스템을 고려하면 식 (14)를 연속해서 불연속면이 서로 만나는 점에 적용시킬 수 있고 한 점 j에서의 유량의 합은 식(15)로 표현된다. 식(15)를 모든 블록의 교점에 적용하면 식(16)으로 표현할 수 있다. 식(16)의 해가 교점에서의 수두가 된다. 전체 수리식 식(16)을 풀기 위한 경계조건으로는 경계 부분의 절점에 일정 수두를 가할 수도 있고 일정 유량을 가할 수도 있다.

$$\sum Q_j^i = C_j \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{Bmatrix} \quad (16)$$

3.3 불연속 변형 해석의 수입항

삼차원 불연속 변형 해석에서는 블록의 모든 면을 삼

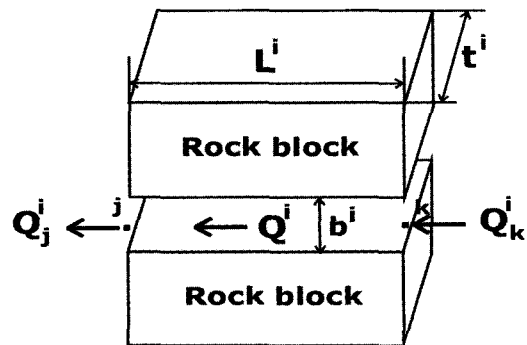


Fig. 9. Flow in single parallel plane element.

각형으로 나누어 해석한다. 그러므로 직사각형인 삼차원 블록의 면은 두 개의 삼각형으로 나누어지며 이때의 세점을 P1, P2, P3, 각 점의 좌표를 각각 (x1, y1, z1) (x2, y2, z2) (x3, y3, z3)라 하고 각 점에서의 압력을 (px1, py1, pz1), (px2, py2, pz2) (px3, py3, pz3)라 하면 삼각형 내부 임의의 점의 좌표값과 압력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + r(x_2 - x_1) + t(x_3 - x_1) \\ y &= y_1 + r(y_2 - y_1) + t(y_3 - y_1) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} z &= z_1 + r(z_2 - z_1) + t(z_3 - z_1) \quad (0 \leq r, t \leq 1) \\ p_x &= p_{x1} + r(p_{x2} - p_{x1}) + t(p_{x3} - p_{x1}) \\ p_y &= p_{y1} + r(p_{y2} - p_{y1}) + t(p_{y3} - p_{y1}) \\ p_z &= p_{z1} + r(p_{z2} - p_{z1}) + t(p_{z3} - p_{z1}) \quad (0 \leq r, t \leq 1) \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로 각 절점에서의 수압에 의한 포텐셜에너지 Π_p 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Pi_p &= \int_1^0 \int_1^0 \left(\frac{px}{py} \right) A[u] dr dt = \\ & - A[d] \int_1^0 \int_1^0 [T] dr dt = - A[F_p]^T [d] \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $[T]$ 는 일차원 근사 함수이고 $[D]$ 는 변위이며 A 는 변형 전후의 넓이가 일정하다고 가정할 때의 삼각형의 넓이, (x_c, y_c, z_c) 는 블록의 무게중심이다.

식 (17), (18)을 식 (19)에 대입하고 적분하면 $[F_p]$ 는 다음과 같이 된다.

$$[F_p] = \begin{bmatrix} \frac{px_2 + px_3}{2} \\ \frac{py_2 + py_3}{2} \\ \frac{pz_2 + pz_3}{2} \\ \frac{py_1}{12} X_{11} + \frac{py_2}{12} X_{22} + \frac{py_3}{12} X_{33} - \frac{px_1}{12} Y_{11} - \frac{px_2}{12} Y_{22} - \frac{px_3}{12} Y_{33} \\ \frac{pz_1}{12} Y_{11} + \frac{pz_2}{12} Y_{22} + \frac{pz_3}{12} Y_{33} - \frac{py_1}{12} Z_{11} - \frac{py_2}{12} Z_{22} - \frac{py_3}{12} Z_{33} \\ - \frac{pz_1}{12} X_{11} - \frac{pz_2}{12} X_{22} - \frac{pz_3}{12} X_{33} + \frac{px_1}{12} Z_{11} + \frac{px_2}{12} Z_{22} + \frac{px_3}{12} Z_{33} \\ \frac{px_1}{12} X_{11} + \frac{px_2}{12} X_{22} + \frac{px_3}{12} X_{33} \\ \frac{py_1}{12} Y_{11} + \frac{py_2}{12} Y_{22} + \frac{py_3}{12} Y_{33} \\ \frac{pz_1}{12} Z_{11} + \frac{pz_2}{12} Z_{22} + \frac{pz_3}{12} Z_{33} \\ \frac{py_1}{24} X_{11} + \frac{py_2}{24} X_{22} + \frac{py_3}{24} X_{33} + \frac{px_1}{24} Y_{11} + \frac{px_2}{24} Y_{22} + \frac{px_3}{24} Y_{33} \\ \frac{pz_1}{24} Y_{11} + \frac{pz_2}{24} Y_{22} + \frac{pz_3}{24} Y_{33} + \frac{py_1}{24} Z_{11} + \frac{py_2}{24} Z_{22} + \frac{py_3}{24} Z_{33} \\ \frac{pz_1}{24} X_{11} + \frac{pz_2}{24} X_{22} + \frac{pz_3}{24} X_{33} + \frac{px_1}{24} Z_{11} + \frac{px_2}{24} Z_{22} + \frac{px_3}{24} Z_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} X_{11} &= 2x_1 - x_2 - x_3 \\ X_{22} &= -x_1 + 4x_2 + 3x_3 - 6x_c \\ X_{33} &= -x_1 + 3x_2 + 4x_3 - 6x_c \\ Y_{11} &= 2y_1 - y_2 - y_3 \\ Y_{22} &= -y_1 + 4y_2 + 3y_3 - 6y_c \\ Y_{33} &= -y_1 + 3y_2 + 4y_3 - 6y_c \\ Z_{11} &= 2z_1 - z_2 - z_3 \\ Z_{22} &= -z_1 + 4z_2 + 3z_3 - 6z_c \\ Z_{33} &= -z_1 + 3z_2 + 4z_3 - 6z_c \end{aligned}$$

포텐셜 에너지의 최소화를 위해 미분하면 식 (21)를 얻을 수 있다.

$$A[F_p] = [F_i] \quad (21)$$

식 (21)이 식 (3)의 전체 평형방정식에 포함된다.

4. 역학, 수리-역학적 상호작용 해석의 적용

개발된 프로그램을 이용하여 역학적 해석 중 전도파괴 사례에 대하여 적용하였고 수리-역학 상호작용해석을 위해 불연속면을 발생시켜 블록을 만들고 지하수면의 높이에 따른 공동의 변위를 계산하였다.

4.1 전도파괴 모델링

전도파괴를 모델링하기 위하여 Fig. 10 (a)와 같은 단순한 모델을 만들었다. 블록 번호는 왼쪽에서 오른쪽으로 가면서 1번부터 10번까지 지정하였다. 수평판 위에 가로, 세로 10 m 두께 1 m인 블록이 놓여져 있고 10번 블록의 상부 두 꼭지점에 각각 0.1 MN의 힘이 가해지는 조건이다. 힘을 시간단계 90초까지 가하였다가 이후에는 제거하였다. 블록의 물성은 Table 2를 사용하였고 시간단계 120초까지 해석하였으며 마찰각은 10°이다.

해석 결과가 Fig. 10 (b)-(e)에 나타나 있다. 10번 블록의 상부 점에 힘을 가하는 조건이므로 10번 블록의 아래 점을 회전 중심으로 반시계방향 회전이 발생한다.

Table 2. Input parameters for toppling analysis.

Stiffness of spring	10 GN/m
Unit weight	2.7 ton/m ³
Young's modulus	10 GPa
Initial time step	0.01 sec
Total step	2000
Poisson's ratio	0.24

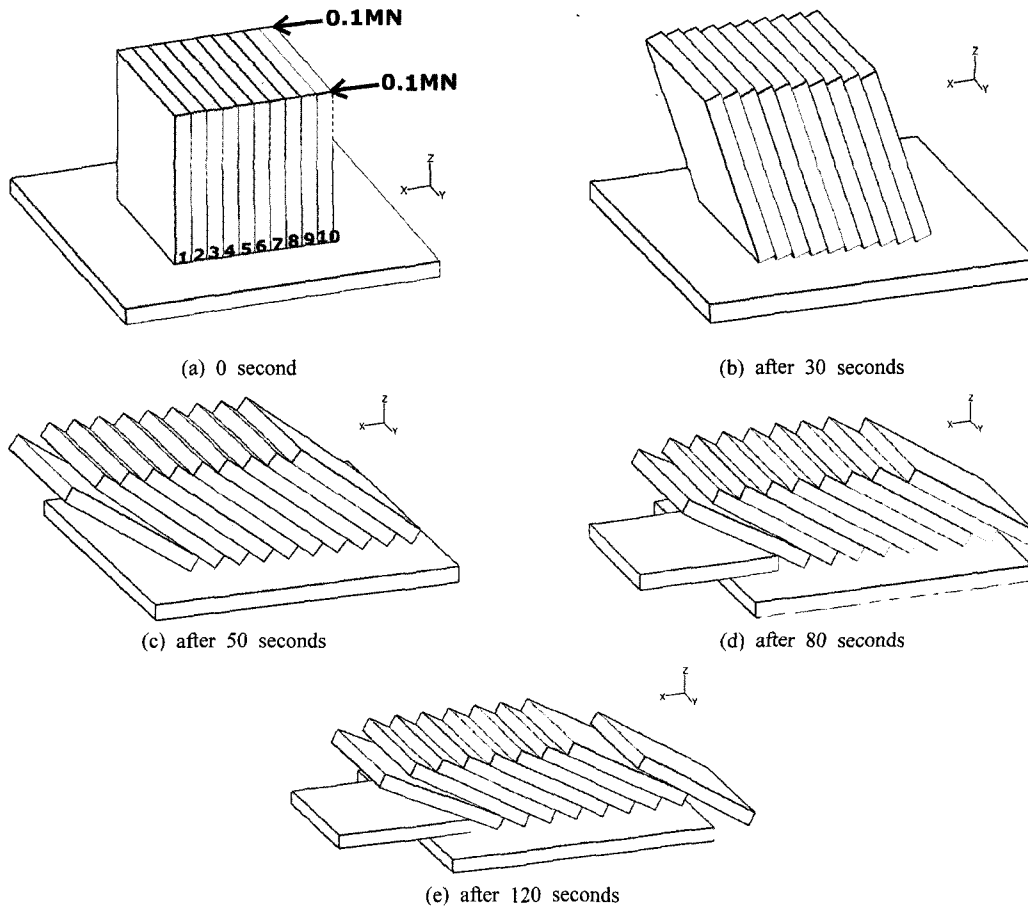


Fig. 10. Deformed blocks in toppling blocks.

Fig. 10 (b)는 시간단계 30초 후의 모습으로 10번 블록의 회전이 다른 블록에 힘을 전달하여 모든 블록이 차례로 반시계방향으로 회전하는 모습을 보여준다. 이 해석에서는 마찰각이 10° 이므로 10번 블록의 아래점이 오른쪽으로 이동하지 않았지만 만일 마찰각이 더 작아진다면 위쪽 힘의 영향으로 아래점이 오른쪽으로 이동할 수도 있다. Fig. 10 (c)는 시간단계 50초 후의 모습으로 Fig. 10 (b)보다 더 반시계방향으로 모든 블록들이 회전하였으며 각 블록들이 오른쪽 블록을 하중을 동시에 받기 때문에 더 큰 회전력이 발생하여 아래 점들이 오른쪽으로 이동된 상태이다. 1번 블록은 왼쪽에 지지할 블록이 없기 때문에 계속된 반시계방향 회전에 의하여 2번 블록과의 접촉이 초기 상태 4점에서 2점으로 줄어든 상태이다. Fig. 10 (d)는 시간단계 80초 후의 모습으로 1번 블록은 반시계방향 회전을 계속하여 아래 판에 닿은 상태이며 2번 블록은 오른쪽 3번 블록과의 접촉이 2점으로 줄어든 상태이다. 각 블록들의 아래 점들이 오

른쪽으로 많이 이동하였고 10번 블록은 아래 판과 떨어져서 9번 블록의 상부에 존재하는 모양이다. Fig. 10 (e)는 해석 단계 120초 후의 모습으로 90초가 지나면서 힘을 제거하였고 1번 블록이 아래 판과 접촉하여 다른 점들을 지지해 주는 형태이므로 다른 블록들의 변위는 큰 변화가 없지만 10번 블록이 9번 블록의 상부 면으로 미끄러지고 있다. 마찰각은 10° 이고 9번 블록의 상부면 경사는 10° 보다는 크기 때문에 10번 블록은 계속 미끄러지게 된다.

0.1 MN이 10번 블록 위의 두 꼭지점에 가해지고 10개의 블록이 일정한 마찰각을 가지는 조건일 때 마찰각을 변화시키면서 어느 정도의 각도에서 블록들이 정지될 것인가를 해석하였다. Fig. 11에 결과가 나타나있다. 해석 각도는 $19^\circ \sim 24^\circ$ 까지 0.1° 간격으로 계산하였으며 모든 접촉의 상태를 미끄러짐과 정지로 나누어 개수를 기록하였다. 결과를 보면 21.8° 에서 모든 블록이 정지한 것으로 나타났으며 그 이전까지는 모든 접촉이 미끄러

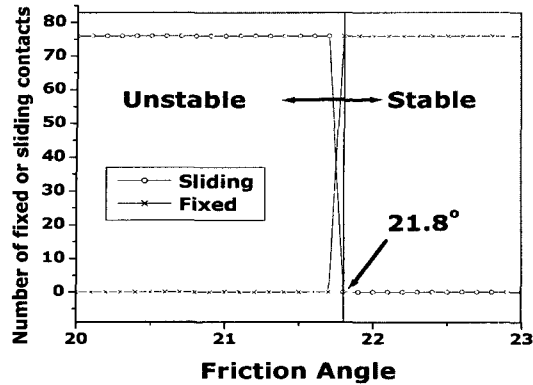


Fig. 11. Stability analysis of toppling blocks.

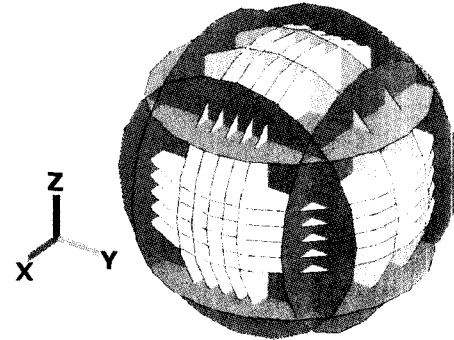


Fig. 12. Discontinuities for hydro-mechanical stability analysis.

짐으로 계산되었다. 그러므로 해석 조건의 블록은 입체 마찰각을 21.8°로 정할 수 있고 그 보다 큰 각도의 마찰 각에서는 외부하중 조건이 변하지 않으면 안정된 상태로 계속 유지될 것이다.

4.2 수리-역학적 상호작용 적용

수수리 계산을 통해 얻어진 각 절점의 수두 값을 블록의 변형해석에 이용하여 수리해석과 역학적 해석과의 상호작용을 모사해야 한다. 이 과정은 계산된 수두 값을 블록에 작용하는 압력으로 전환하여 가능하다. 유체의 압력을 블록의 모서리에 작용하는 점하중으로 변

Table 3. Input parameters for hydro-mechanical analysis.

Stiffness of Spring	10 GN/m
Unit weight	2.7 ton/m ³
Stiffness of block	10 GPa
Initial aperture	0.01 mm
Initial time step	0.01 sec
Total step	2000
Poisson's ratio	0.24
Friction angle	30°

Table 4. Properties of input discontinuities for hydro-mechanical analysis (dimension = m).

No. of Plane	X of Center	Y of Center	Z of Center	X of Normal	Y of Normal	Z of Normal	Radius
1	0	5	5	1	0	0	8
2	10	5	5	1	0	0	8
3	5	0	5	0	1	0	8
4	5	10	5	0	1	0	8
5	5	5	0	0	0	1	8
6	5	5	10	0	0	1	8
7	3	5	5	1	0	0	8
8	6	5	5	1	0	0	8
9	5	3	5	0	1	0	8
10	5	4	5	0	1	0	8
11	5	5	5	0	1	0	8
12	5	6	5	0	1	0	8
13	5	7	5	0	1	0	8
14	5	5	3	0	0	1	8
15	5	5	4	0	0	1	8
16	5	5	5	0	0	1	8
17	5	5	6	0	0	1	8
18	5	5	7	0	0	1	8

Table 5. Effect of water level (W.L.) on the stability of the tunnel.

Water Level (m)	Roof Settlement (mm)
0	13.5
10	37.2
20	87.5
30	127.1
40	253.3
50	457.7

환하여 계산한다. 점하중이 가해지는 블록에서의 변형을 계산하면 유체의 영향과 블록의 변형간의 상호작용을 계산하게 된다.

상호작용 해석을 위해 불연속면 자료를 입력하여 블록을 생성하여 해석하였다. 해석을 위한 물성을 Table 3에 나타내었고 블록 생성을 위한 불연속면의 중심좌표, 방향, 반경을 Table 4에 나타내었다. Fig.12는 Table 4의 입력자료로 만들어진 불연속면을 나타낸다. 총 18개의 불연속면이 해석을 위한 블록입력자료로 사용되었는데 Table 4에서 1-6번 불연속면은 x, y, z 방향으로 길이가 각각 10 m인 정육면체 블록을 만들기 위한 불연속면을 나타내고 7-18번 불연속면이 블록을 만들기 위한 불연속면으로 사용된다. 이 연구에서의 수리해석을 위한 블록은 직육면체만을 사용할 수 있으므로 각

불연속면들은 서로 직각이고 반경은 모든 블록을 충분히 생성할 수 있도록 8 m로 정하였다. Fig. 12를 보면 정육면체 형성을 위한 6개의 불연속면과 x-y 평면에 평행한 5개의 불연속면, z-x평면에 평행한 5개의 불연속면, y-z평면에 평행한 2개의 불연속면을 볼 수 있다.

Fig. 13의 (a)-(f)는 지하수면의 변화에 따른 해석결과를 나타내고 해석 시간 종료 후 사각형 모양의 터널의 천정부의 변위를 Table 5에 나타내었다. 변위는 지하수면이 높을수록 증가하는 경향을 보였으며 천정부를 지지하는 블록이 없기 때문에 해석 블록중의 천정부 위부분의 블록들이 모두 아래로 미끄러지는 경향을 보였다. 같은 물성값을 가지고 해석한 결과 지하수위가 0인 경우 지하수의 영향이 없을 때 13.5 mm의 변위를 보였으나 지하수위가 높아져서 50 m인 경우 457.7 mm의 변위를 보여 공동이 파괴되는 결과가 나타났다. 그러므로 해석조건에서의 지하수위는 공동의 안정성에 심각한 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

5. 결 론

이 연구에서는 수리-역학적 상호작용의 해석을 위해 이차원 역학적 해석인 불연속변형해석(DDA) 이론을 삼차원으로 확장하여 검증을 위해 블록에 적용하여 해석하였다. 그리고 수리 상호작용 이론을 삼차원으로 확

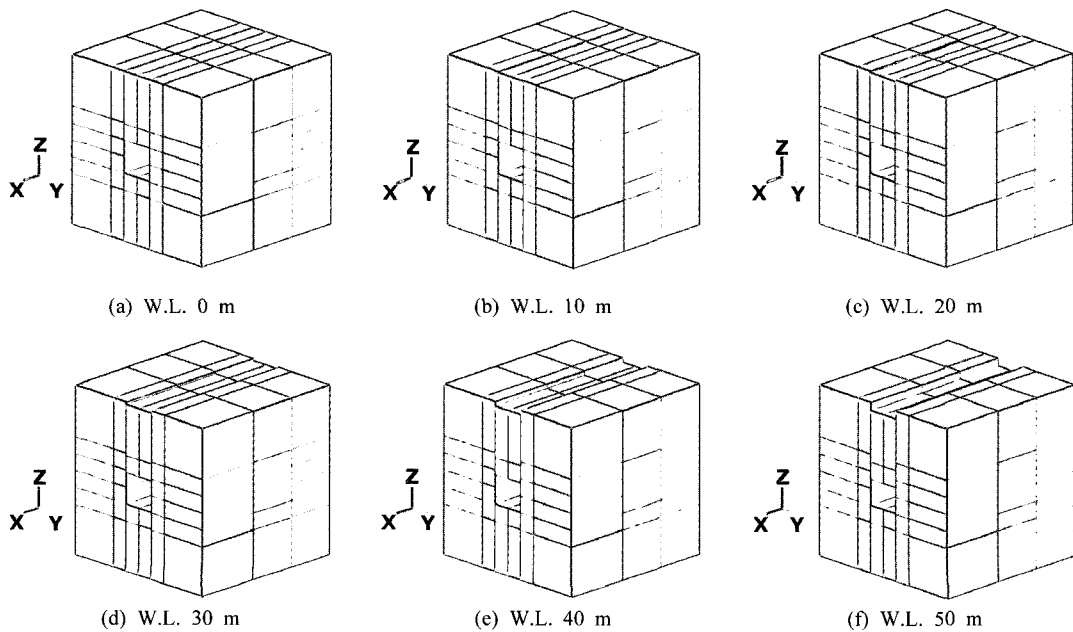


Fig. 13. Effect of water level on tunnel stability (10 m×10 m×10 m).

장하여 프로그램을 개발하였으며 지하수위가 있는 공동을 형성하여 수리-역학적 상호작용을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 불연속 변형 해석의 역학적 해석을 위해 전도파괴를 모델링하여 해석을 실시하였다. 그 결과 마찰각이 어떤 값을 가질 때 블록들이 안정할 수 있는가를 계산할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 모델과 입력자료로부터 해석한 결과 21.8°이상의 마찰각에서 안정하다는 결과를 얻었다.
- 2) 수리-역학적 상호작용 해석을 위해 기존의 상호작용 해석 연구를 삼차원으로 확장하였으며 실제 블록에 적용하여 지하수위를 0-50 m까지 10 m증가시키면서 해석하여 공동 천정부의 변위를 계산할 결과 지하수위가 증가할수록 변위가 증가하였으며 공동의 안정성에 심각한 문제를 발생시키는 것을 확인하였다.
- 3) 이 연구에서 개발한 이론을 토대로 모양이 일정하지 않은 블록에 적용할 수 있는 이론을 개발하면 보다 실제에 가까운 해석을 실시할 수 있을 것이며 원유 및 가스 지하저장시설의 설계에 이용할 수 있을 것이다.

사 사

“이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음” (KRF-97-005-E00039).

참고문헌

1. 김용일, 1999, 불연속변형해석법에 의한 지하수-암반블록 상호작용 모델링, 한국암반공학회, 9. 149-157.
2. 안형준, 1996, 암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석적 연구, 서울대학교 석사학위 논문.
3. 장근무, 이정인, 1995, 지하원유저장 공동 주위 암반의 변형거동에 따른 투수계수 변화, 한국자원공학회지, 32.2,

- 103-115.
4. 장현익, 장근무, 이정인, 1996, 통계적 접근법에 의한 불연속 암반의 지하수 유동해석, 한국암반공학회지, 6.1, 30-38.
5. 장현익, 이정인, 2002, 삼차원 불연속 변형 해석(DDA)을 이용한 블록거동해석, 한국암반공학회지, 12.3, 158-170.
6. Chiles, J.P, 1988, Three dimensional geometric modeling of a fracture network, Proc. of conference on geostatistical, sensitivity and Uncertainty methods for groundwater flow & radionuclide transport modeling, 361-386.
7. Guvanasen V., Chan T., 1991, Three-dimensional finite element solution for heat and fluid transport in deformable rock masses with discrete fractures.
8. Jing, L., Mab, Y., Zulie Fang, Z., 2001, Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences. 38, 343-355.
9. Louis C., 1969, A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses, Imperial College, Rock Mechanics Research Report No. 10.
10. Noorishad J., Witherspoon P.A., 1982, A finite element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Gemech. Abstract, 19, 185-193.
11. Samaniego J.A., 1985, Simulation of fluid in fractured rock; a probabilistic approach, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology.
12. Sato M., Kamemura K., 1985, Rock mass behavior considering water flow and heat transfer, Fifth Int. Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, 703-710.
13. Shi, G-H, and Goodman, R.E., 1984, Discontinuous deformation analysis, Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 269-277.
14. Shi, G-H, 1988, Discontinuous deformation analysis : a new numerical model for the static and dynamics of block systems, PhD thesis, Civil Eng., University of California, Berkeley.
15. Wei L., 1992, Numerical studies of the hydro-mechanical behavior of jointed rocks, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology.

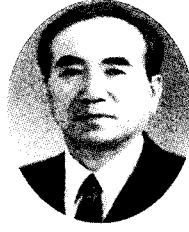
장현익



1994년 서울대학교 자원공학과 학사
1996년 서울대학교 자원공학과 석사
2001년 서울대학교
지구환경시스템공학부 박사

Tel: 02-880-8701(311)
E-mail: janghi@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공학연구소 연수연구원

이정인



1963년 서울대학교 공과대학 광산학과
공학사
1965년 서울대학교 대학원 광산학과
공학석사

1974년 일본 도호쿠대학(東北大學)
대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-880-7221

E-mail: cilee@plaza.snu.ac.kr
현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
교수
