

## 3차원 수G치해석 모델링에 의한 지하공동내 유입량, 유동시간, 유동길이 변화 해석

강재기, 양형식<sup>1)</sup>, 김경수, 김천수<sup>2)</sup>,  
<sup>1)</sup>전남대학교, <sup>2)</sup>한국원자력연구소

### 1. 서론

지하에 건설되는 지하원유비축시설의 저장 원리는 원유가 물보다 가볍고 서로 혼합되지 않는다는 특성을 이용하여 공동주변 지하수압이 공동의 가스압력보다 높게 유지하도록 하여 저장물이 저유공동 주변의 암반이나 생태계로 유출되는 것을 방지하는 것이다. 즉, 지하심부 결정질암반에서 건설되는 비축시설의 안정성은 저장물의 수밀성 유지가 관건이 된다. 이를 위해 암반절리를 따라 이동할 수 있는 기포형태의 가스가 저유공동 쪽으로 이동하도록 수두분포가 형성되어야 하며 이의 만족조건은 수직동수구배가 1보다 커야 한다는 것이다(Aberg, 1977).

본 연구는 지하원유비축시설이 건설되고 있는 지역을 대상으로 기존의 지표조사, 시추조사 및 수리시험 자료 등을 기초로 균열망 개념과 연속체 개념의 지하수유동 수치모델링을 실시하였다.

연속체 수치모델에 입력된 이방성 수리전도도 값은 연구지역에 분포하는 균열체계의 확률적 분포특성이 반영된 균열망 모델에서 역산하였고, 공동 굴착단계에서 얻어진 유입량 등을 이용하여 최종적인 모델로 교정하였다. 교정된 모델을 기초로 모델의 공동내 유입량, 유동시간, 유동경로를 계산하였다.

### 2. 연구지역의 수리지질학적 특성

#### 2.1 연구지역

본 논문은 ○○지역 추가비축기지(Fig.1)를 대상으로 하고 있다. 추가비축기지의 북쪽과 동쪽은 바다와 인접해 있고, 정상부는 해발 350여 미터를 정점으로 하는 급격한 경사를 가진 지형이다. 본 논문의 광역 연속체 모델링은 Dirichlet 경계조건을 이용하여 3차원 연속체 수치 해석 모델링을 수행하였다.

#### 2.2 연구지역의 불연속면 분포 특성

수치 해석 모델링에 있어서 현장조건과 유사한 3차원 균열망을 작성하기 위해서 연구지역의 지표조사, 시추조사, 수리시험, 텔레뷰어(Televiewer) 검층 등을 통하여 불연속면 자료를 도출하였으며 이를 통계적으로 처리하여 해석하였다.

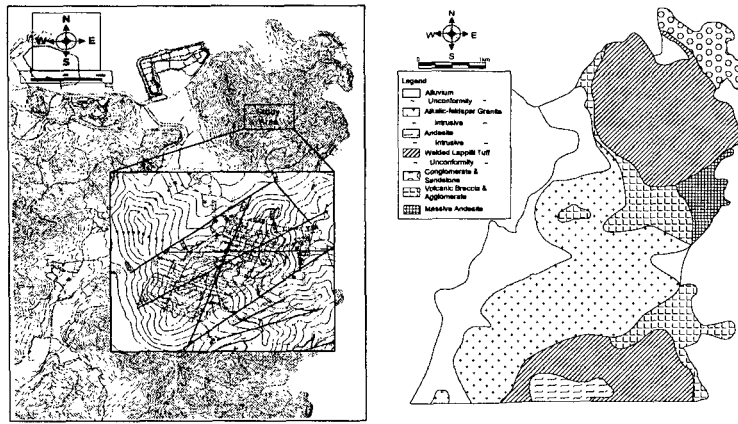
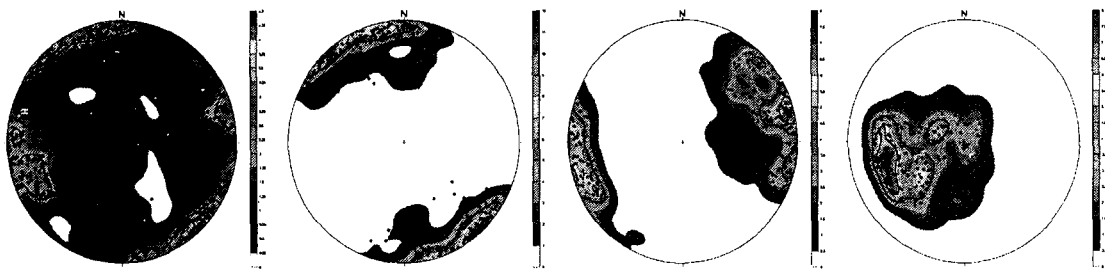


Fig.1. Geologic map of the study area

### 2.2.1 불연속면의 방향성(Orientation)

시추조사에 의한 불연속면의 분포 특성중 불연속면의 방향성은 텔레뷰어 검층에 의해 주로 이루어진다. 텔레뷰어에 의한 시추공 이미지 검층은 3가지 타입(open fracture, semi-open fracture, closed fracture)으로 분류하여 그 중에서 투수성 균열(open fracture, semi-open fracture)에 대해서만 방향성을 분석하였다.

FracMan(Golder Assoc. Inc., 1998) 코드를 이용하여 3개의 균열군으로 분리하면 Fig.2의 (b), (c), (d)와 같이 된다. 방향성 자료에 대한 확률분포함수는 Fisher 함수를 따르는 것으로 해석할 수 있다(Priest, 1993). FracMan을 이용한 각 균열군의 우세 발달방향은 155.2/87.6, 253.7/78.3, 72.7/35.7이며, Fisher Dispersion(K) 값은 8.38, 7.43, 7.67로 분석되었다.



(a)Set All(694 Poles) (b)Set 1(273 Poles, 39.3%) (c)Set 2(256 Poles, 36.9%) (d)Set 3(165 Poles, 23.8%)

Fig.2. Stereographic projection of poles for the fractures(In-situ data)

### 2.2.2 불연속면의 간격(Spacing)

각 시추공에서 조사된 불연속면의 겉보기 간격(apparent spacing)은 각각의 시추공의 시추방향과 각 균열군의 수선방향이 이루는 각도를 이용하여 보정하였다(Terzaghi, 1965). 대부분의 불연속면의 간격은 Lognormal 분포를 보이는데 여기에서도 로그정규분포로 분석되었다(Priest, 1993). 각 균열군별 평균불연속면의

간격은 10.21m, 10.89m, 16.89m로 조사되었다.

### 2.2.3 불연속면의 밀도(Density)

일반적으로 불연속면의 밀도( $\rho$ )는 불연속면의 수를 면적으로 나눈 값이다. 이를 3차원상에서 구하기 위해서는 불연속면의 간격, 불연속면의 길이, 그리고 불연속면의 길이에 상응하는 불연속면의 경사가 고려되어야 한다. 그리고 이들이 모두 무작위적이라면 불연속면의 밀도는 이들 각각의 평균값을 구해 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.(Priest, 1993; 박병운, 2000)

$$\rho = \frac{1}{\text{mean}(s) \cdot \text{mean}(l^2) \cdot \text{mean}(\cos D)}$$

이 식에 따라 현장과 유사한 균열망 작성시 필요한 불연속면의 밀도는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Fracture density of each fracture set

| Item                  | Set 1      | Set 2      | Set 3      |
|-----------------------|------------|------------|------------|
| Number of Fractures   | 273(39.3%) | 256(36.9%) | 165(23.8%) |
| Mean(S)(m)            | 10.21      | 10.89      | 16.89      |
| Mean(L <sup>2</sup> ) | 16.497     | 22.970     | 13.005     |
| Mean(cosD)            | 0.222      | 0.302      | 0.707      |
| Fracture Density      | 0.027      | 0.013      | 0.006      |

### 2.2.4 불연속면의 추적길이(Trace Length)

불연속면의 길이는 시추조사만으로는 알 수 없으므로 기 발표된 논문(박병운, 2000)을 참조하였다. 이에 의하면 불연속면의 추적길이 분포는 지수분포를 갖으며 이 분포함수를 찾기 위해 추적길이 L을 독립변수로 하는 지수분포식을 설정하고 이에 상응하는 상수 C와  $\lambda$ 를 결정하였다.

Table 2. C and  $\lambda$  of each fracture set

| Item                  | Set 1  | Set 2  | Set 3  |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Mean(L <sup>2</sup> ) | 16.497 | 22.970 | 13.005 |
| L <sub>max</sub>      | 20     | 30     | 10.5   |
| L <sub>min</sub>      | 1.0    | 1.0    | 1.0    |
| $\lambda$             | 2.326  | 2.249  | 1.862  |
| C                     | 1.351  | 1.267  | 0.993  |

### 2.2.5 불연속면의 틈새 크기 (Aperture size)

각 시추공의 텔레뷰어 이미지를 대상으로 AperSa프로그램(KAERI & KIGAM, 1999)을 이용하여 균열에 대한 틈새 크기를 계산하였다. 균열 틈새 역시 로그정규분포함수를 갖는 것으로 분석되었다. 이들에 대한 통계처리 값들은 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Fracture aperture of each fracture set

| Item               | Set 1     | Set 2     | Set 3     |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Mean(Aperture)     | 6.903E-06 | 9.221E-06 | 1.009E-05 |
| STD(Aperture)      | 1.224E-05 | 3.478E-05 | 1.934E-05 |
| Mean(Ln(Aperture)) | -12.358   | -12.369   | -12.049   |
| STD(Ln(Aperture))  | 0.905     | 1.054     | 1.041     |

## 3. 3차원 균열망 작성

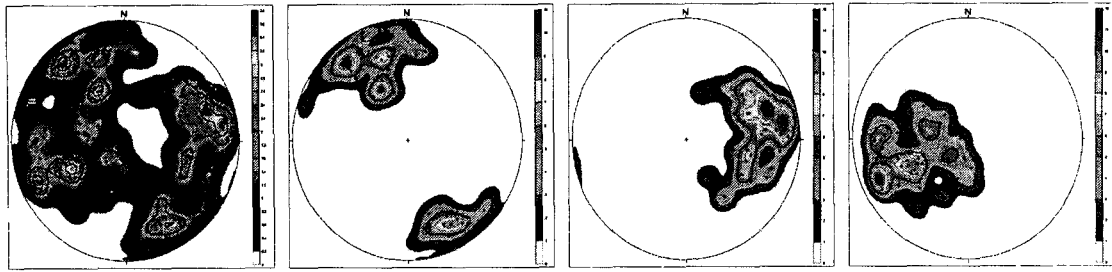
### 3.1 기하학적 일치

통계적으로 처리된 현장 자료를 기초로 NAPSAC을 통하여 균열망을 작성하였다. 이때의 암반 블록 사이즈는 100m×100m×500m 로서 이보다 큰 체적에서는 Dimension overflow가 발생하여 계산이 불가능하였다. 이렇게 하여 발생시킨 극점의 수는 125개(Set 1 : 49, Set 2 : 46, Set 3 : 30)이다. 형성된 극점을 스테레오네트에 투영하면 Fig.3과 같이 나타난다.

Set 별 극점 수의 비율이 같고 전체적으로 Fig.2와 유사한 분포를 보이므로 생성된 균열망은 기하학적 측면에서 확률적으로 해석영역 전체를 대표한다고 할 수 있다. 그리고 이 값은 수리적으로 일치하는 균열망을 작성하는데 다시 사용된다.

### 3.2 수리학적 일치

균열망 모델링을 통한 이방성 수리전도도를 계산하기 위해서는 수리적 틈새(hydraulic aperture)나 투수량계수(transmissivity) 중 하나의 값을 사용한다. 텔레뷰어 검층에 의해 계산된 틈새 크기는 물리적인 틈새(physical aperture) 크기이므로 이를 수리적 틈새로 변형하여야 하지만 본 논문에서는 현장에서 계측된 수리전도도를 이용하여 투수량계수를 계산한 다음 이를 다시 역으로 하여 물리적인 틈새 크기와 수리적인 틈새 크기 사이의 상관성을 확인하였다.



(a)Set All(125 Poles) (b)Set 1(49 Poles, 39.3%) (c)Set 2(46 Poles, 36.9%) (d)Set 3(30 Poles, 23.8%)

Fig.3. Stereographic projection of poles for the fractures(NAPSAC data)

Table 4. Anisotropic hydraulic conductivity(K)

| Item | Kxx        | Kyy        | Kzz        | Kxy        | Kyz         | Kxz         |
|------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| K    | 4.2098E-16 | 5.4819E-16 | 6.4402E-16 | 5.5018E-17 | -1.3230E-16 | -5.7409E-17 |

Table 4은 현장에서 측정한 유효수리전도도와 일치하도록 여러번의 시행착오를 거친 후에 최종적으로 산출된 이방성 수리전도도이다. 이 값은 연속체 모델링(NAMMU)의 입력자료로도 사용되었다.

#### 4. 공동내 유입량 예측 및 유동경로, 유동시간의 산출

##### 4.1 해석 프로그램

이방성 수리전도도를 역산하고 현장과 실제적으로 유사한 3차원 균열망 모델링을 수행하는데에는 NAPSAC(Hartley, 1998), NAMMU(Hartley, 1996), CONNECT FLOW(Hartley, 1996) 코드를 사용하였다.

##### 4.2 연속체 모델링

공동이 굴착될 위치를 기준으로 6.0km×6.0km×1.3km의 해석영역을 설정하였으며 경계조건의 문제를 해결하기 위하여 바다쪽으로 북쪽과 동쪽의 경계범위를 확장하여 설정하였다. Fig.4는 등수두선을 상부경계로 하여 작성한 유한요소모델을 보인 것이다.

해석모델에는 6개의 지하원유 저장공동을 포함시켰으며, 공동의 폭은 20m, 높이는 30m로 하였으며 모든 저장공동의 바닥은 EL.-60m에 위치하도록 하였다.

일반적인 수두 조건에 의한 유입량과 건기(12, 1, 2월)와 우기(6, 7, 8월)에 의한 유입량의 변화를 보기 위하여 상부수두를 약10% 달리하여 유입량을 산출하였다.

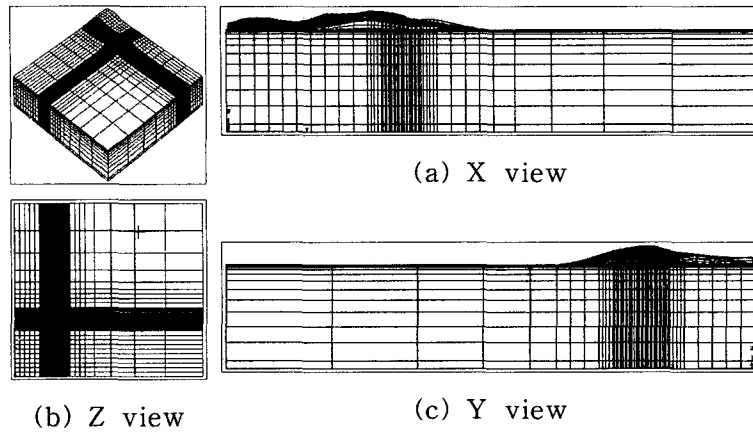


Fig.4. Finite element model mesh(X, Y, Z view)

#### 4.3 해석결과

모델 교정을 통하여 계산된 공동내로의 지하수 유입량을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5. Calculated total inflow into the storage caverns

| Caverns<br>(Length) | Total inflow(m <sup>3</sup> /day) |            |            |
|---------------------|-----------------------------------|------------|------------|
|                     | normal                            | dry season | wet season |
| 1 (400m)            | 138.63                            | 123.38     | 156.65     |
| 2 (200m)            | 75.811                            | 65.95      | 84.91      |
| 3 (480m)            | 144.74                            | 127.37     | 162.10     |
| 4 (400m)            | 137.16                            | 123.45     | 150.88     |
| 5 (340m)            | 102.88                            | 93.62      | 115.22     |
| 6 (340m)            | 115.90                            | 101.99     | 130.96     |

유입량의 추이를 보면 일반적인 경우 75~138m<sup>3</sup>/day이 공동내로 유입될 것으로 예측되었고, 건기(12, 1, 2월)에는 65~127m<sup>3</sup>/day, 우기(6, 7, 8월)에는 84~156 m<sup>3</sup>/day이 공동내로 유입될 것으로 예측되었다. 이들은 대략 10%의 강수량 차이를 보이는 건기와 우기의 강수량 변화와 거의 유사한 유입량 변화를 보이는 것으로 예측되었다. Fig. 5는 누출된 유류의 유동경로를 보인 것이다.

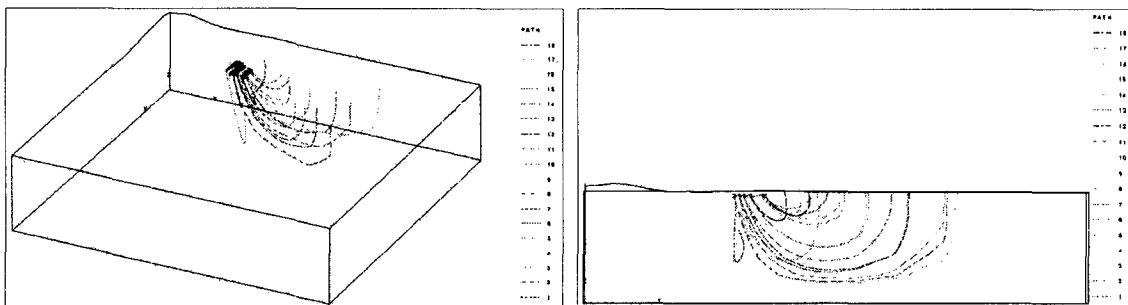


Fig.5. Pathway using anisotropic hydraulic conductivity

이방성 수리전도도에 의해 계산된 유동거리는 평균 2939.2m로 계산되었고, 소요시간은 23364년으로 계산되었다. 그리고 건기(12, 1, 2월)때의 유동거리는 1868.5m, 소요시간은 27094년으로 계산되었으며 우기(6, 7, 8월)때는 2372.3m, 26401년으로 계산되었다. 이는 유입량과 마찬가지로 10%의 강수량 차이에 의한 우기와 건기 시의 유동거리와 소요시간 변화도 유사한 변화를 보이는 것으로 예측할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구는 지하공동기지를 대상으로 3차원 수치해석 모델링을 실시하여 공동 내 지하수의 유입량, 유동거리, 소요시간을 계산하였으며, 또한 건기(12, 1, 2월)와 우기(6, 7, 8월)때의 변화도 계산하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 현장자료를 불연속면의 기하적인 요소와 수리적인 요소로 분리 고려하여 균열망을 구축하였다.
- 2) 현장의 수리시험 자료를 기하평균으로 구한 현장의 유효수리전도도를 통하여 이방성 수리전도도를 산출하였으며 이를 모델링에 이용하였다.
- 3) 우리나라의 기상여건을 고려하여 건기(12, 1, 2월)와 우기(6, 7, 8월)시의 강수량 차이를 이용하여 유입량을 비교 분석한 결과, 유입량, 유동거리, 소요시간에서 강수량 차이와 유사하게 약 10%의 차이를 보였다.

## 참고문헌

- 1 박병윤, 2000, "화산암질 암반에서 공동 굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 3차원 수치모델해석", 공학박사학위논문, 서울대학교 자원공학과
- 2 KAERI & KIGAM, 1999, "AperSa-Aperture Size Analysis Program"(등록번호 99-01-12-4266)
- 3 Golder Assoc. Inc., 1998, "FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling, and exploration simulation(Version 2.603)"
- 4 Hartley, L.J., 1998, "NAPSAC(Release 4.1) Technical Summary Document", AEA Technology", AEA-D&R-0271.
- 5 Hartley, L.J., Jackson, C.P., Watson, S.P., 1996, "NAMMU(Release 6.3) User Guide", AEA Technology, AEA-ES-0138.
- 6 Hartley, L.J., 1996, "CONNECTFLOW(Release 1.0) User Guide", AEA Technology, Waste Environmental Group, AEAT-0527.
- 7 Priest, S.D., 1993, "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", First Edition, Chapman & Hall.
- 8 Terzaghi, R., 1965, "Source of Error in Joint Surveys", Geotechnique, Vol. 15, pp.287~304.
- 9 Åberg, B., 1977, "Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock", The 1st Int'l Symp. on storage in excavated rock caverns, ROCKSTORE 77, Stockholm, Sweden