

〈論 文〉

잉울암골주변 편마암에서의 지하수유동특성 분석 An Analysis on Groundwater Flow Properties in the Gneiss of the Ingulam Valley

김 계 남*, 김 재 한**, 구 자 공***, 안 종 성****

Abstract□ The evaluation of groundwater flow in the Ingulam valley catchment area in the vicinity of Sam-Kwang mine was studied. In this study, field hydraulic tests, groundwater flow measurement, and MODFLOW model application were carried out. The results of analysis are described as follows. The rainwater infiltrated into the ground in the study area, hardly reached the gneiss region deeper than EL.(+)100 m above the surface of seawater. The rainwater infiltrated into the ground near the water system boundary, flowed out into the vicinity of streams and the travel time was between 15 and 263 years. Also, the estimated total flow rate of the groundwater in the study area was 307m³/day.

요 지 : 삼광광산 주변의 잉울암골을 중심으로 수계를 형성하는 유역 내에서의 지하수 유동특성을 분석하였다. 이를 위해 현장수리시험을 실시하고, 지하수 유출량을 측정하고 MODFLOW모형을 이용하였다. 분석결과 연구지역내의 지하수면으로 유입된 강수는 해수면 선상 EL.(+)100m 이하의 편마암 심부로는 거의 침투하지 못했다. 수계경계 부근으로 유입된 강수는 개울 주변으로 유출되었고, 유입강수의 지하수 유동시간은 15년에서 263년 사이의 값으로 계산되었다. 또한 연구지역내에서의 총 지하수 유출량은 307m³/day 로 산정되었다.

I. 序 論

방사성 폐기물을 지하암반에 처분할 때, 수문학적 안전성확보는 무엇보다도 중요하다. 방사성 폐기물을 처분한 후 수백년 이상 생태계로부터 격리시켜 방사능에 의한 장애를 초래하지 않도록 해야 한다. 지하암반에 처분된 방사성 폐기물로부터의 오염물질이 생태계로 이동하는 가장 중요한 추진력은 지하암반 내의 지하수 유동 때문이다. 그러므로 처분장에서 유출된 오염물질이 지하수로 인해 이동되어 생태계를 오염시키는 것에 대한 수문학적 안

전성을 평가를 위한 필수적인 요소인 처분장에서 지표면까지의 지하수의 유동로, 유동시간, 유동량을 현실적이고 신빙성있게 예측하기 위해서는 암반에서의 지하수유동에 관한 연구가 필요하다.

편마암은 국내에서 방사성 폐기물을 처분하기에 적합한 암종중의 하나이다. 본 연구의 목적은 삼광광산 주변의 잉울암골을 중심으로 수계를 형성하는 집수유역내의 편마암에서의 지하수 유동특성을 분석하는 것이다. 이를 위해

- 1) 현장수리시험을 실시하여 수리전도도를 측정하고
- 2) 3차원 MODFLOW 모형을 사용하여 지하수

* 한국원자력연구소 수문기술실 선임연구원

* 충남대학교 토목공학과 교수

* 한국과학기술원 토목공학과 교수

* 한국원자력연구소 수문기술실 실장

유동 체계를 분석하였다.

3) 분석 결과의 검증에 위해 이 지역에서의 강수량, 증발산량, 지하수유출량을 조사하여 물수지를 분석하였고 또한 2차원 TRAFRAP 모형을 이용하였다.

2. 수문학적특성 및 수리학적 매개변수

2.1 지형 및 수문

본 연구 대상 지역은 편마암이 넓게 분포하고 있는 충청남도 청양군에 위치한 삼광광산 주변의 잉울암골과 사점미골을 중심으로 형성되는 집수유역으로 정하였다.

연구지역의 유역면적은 약 462,500m²이며, 이 지역에 유입된 강우는 사점미골과 잉울암골을 따라 동쪽의 유출구에서 합치되어 바위골로 흐른다. 수리전도도 값을 구하기 위해 현장수리시험을 실시한

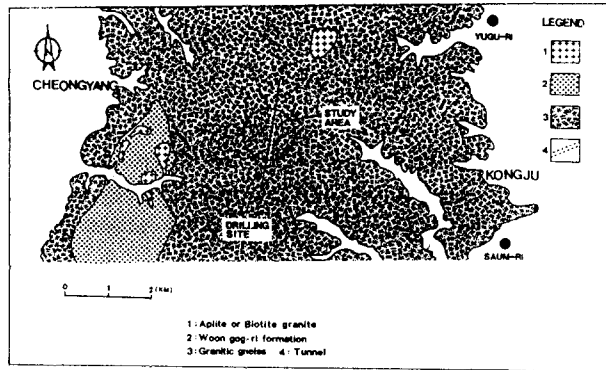


그림 1. 연구지역의 지질도

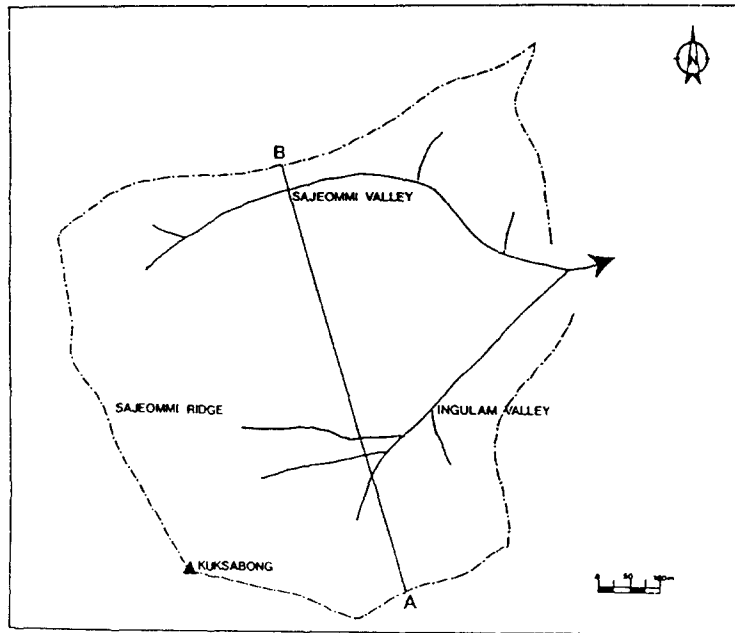


그림 2. 연구지역의 지표수계

장소는 봉갑리의 수리치 성지 남서부 500m지점의 계곡 중심부에 위치한다. 또한 본 지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 편마암으로 구성되어 있다.

삼광광산 인근에서는 현재 기상측후소가 운영되고 있지 않으므로 기상자료를 분석하기 위해서 연구지역으로부터 약 30km 떨어진 대천측후소에서 관측된 자료를 이용하였다. 삼광광산 일대는 차령산맥의 중간에 위치하기 때문에 서해안의 저평지에 비하여 다소 험준한 산악지형에 속한다. 이 일대에서의 강수량은 국지적 산악기후의 특성에 의하여 대체로 많은 편에 속한다. 지난 11년간(1981-1991) 연평균 강수량은 1276.7mm이며 월별 강수량의 분포는 표 1과 같다. 또한 연구지

역의 전역에 내린 일평균 강수량을 계산하면 1619m³/day이다.

삼광광산 일대에서는 대체로 토양의 형성이 양호하여 산림이 울창하다. 기온이 5°C 이상인 계절에는 식물에 의한 증산작용이 빠르지만 온도가 낮은 계절에는 느리다. 증발산량은 현장에서 직접 측정한 자료가 없기 때문에 주변에 위치한 서산, 당진, 덕산 관측자료를 사용하여 물수지를 분석한 결과는 표 2와 같다[2].

표 2에서와 같이 연구지역 주변의 증발산량은 35%이므로 연평균 증발산량은 447mm로 연구지역 전역에 대한 일평균 증발량을 계산하면 567m³/day이다.

표 1. 1981-1991 동안 연구지역에서의 월별 강수량

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Prec. (mm)	33.1	29.5	53.4	68.2	78.7	119.6	322.1	270.8	154.1	48.6	70.3	28.3

표 2. 물수지 분석결과(서산, 당진, 덕산)

구 분	총 면적	수자원총량	증발산량	지하수 함양량	직접유출량
단 위	km ²	10 ⁶ m ³ /년	10 ⁶ m ³ /년	10 ⁶ m ³ /년	10 ⁶ m ³ /년
분 석 결 과	668.7	805.5	281.9	228.8	294.8
비 율	-	100	35.0	28.4	36.6

주) 총유출량중 기저유출에 의한 유출량은 지하수 함양량에 포함하여 산정

2.2 수리학적 매개변수

2. 65m 떨어진 2개의 조사공 B-1과 B-2(그림 1, 3(a))에서 일정압력(3kg/cm²) 주입시험으로 구한 수리전도도는 그림 3 및 표 3과 같다. 각 주입구간에서의 수리전도도는 열극의 발달상태와 열극의 수리적 특수성에 따라 다양한 값을 나타내고 있다. 연구지역에서 조사된 수리전도도의 범위는 1. 53×10⁻⁵~4.95×10⁻⁹m/s이다(표 3).

연구 지역의 지하수 유동체계를 모형화 시키기 위해 그림 2에 표시된 선분 AB에 대한 연직 단면도를 그리면 그림 4와 같다. 이 지역의 수리전도

도는 지표면으로 부터의 심도에 따라 3구역으로 분리했다. 즉 앞의 현장수리시험에 의해 구한 수리전도도를 근거로 하여, 스웨덴의 편마암지역에서 현장수리시험을 통해 구한 공식[4]의 형태인 멱함수의 계수들을 연구지역에서 측정한 자료로부터 구하여 채택한 그림 3(c) 같은 심도별 수리전도도 추정식을 사용하여 3구역에서의 수리전도도를 계산하였다.

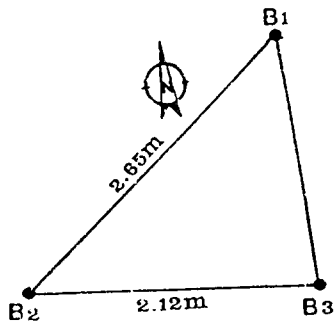
$$K = 1.7 \times 10^{-5} \times Z^{-1.3} \quad (1)$$

여기서, Z : 지표면으로 부터의 깊이(m)

K : 수리전도도(m/sec)

Ⅲ 3. 일정압력 주입시험으로 구한 조사공 B-1과 B-2에서의 수리전도도

Borehole	Test section(M)	Kt(M/S)	Ks(M/S)
B-1	6-9		8.29E(-7)
	9-14	4.46E(-6)	9.28E(-7)
	14-19	1.50E(-7)	1.49E(-7)
	19-24	7.64E(-7)	4.09E(-7)
	24-29	4.70E(-7)	4.22E(-7)
	29-34	1.06E(-6)	3.79E(-7)
	34-39	2.54E(-7)	1.57E(-7)
	39-44	8.13E(-9)	1.57E(-7)
	44-49	7.39E(-8)	8.91E(-8)
	49-54	4.95E(-9)	9.28E(-7)
B-2	6.2-10	8.26E(-7)	5.92E(-7)
	10-15	1.08E(-5)	2.14E(-6)
	15-20	5.79E(-6)	1.74E(-6)
	20-25	1.53E(-5)	2.05E(-6)
	25-30	1.31E(-6)	1.15E(-6)
	30-35	3.08E(-6)	6.17E(-7)
	35-40	1.12E(-7)	1.78E(-7)

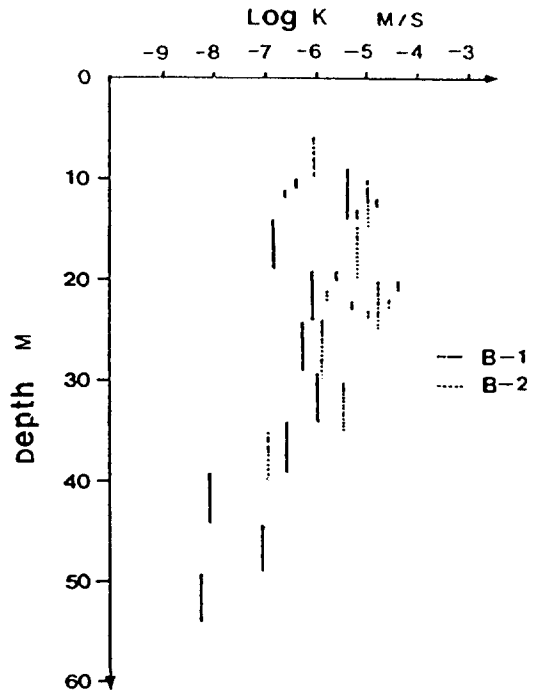


* 조사공 B-3 수리분산 시험시 사용함
(a)

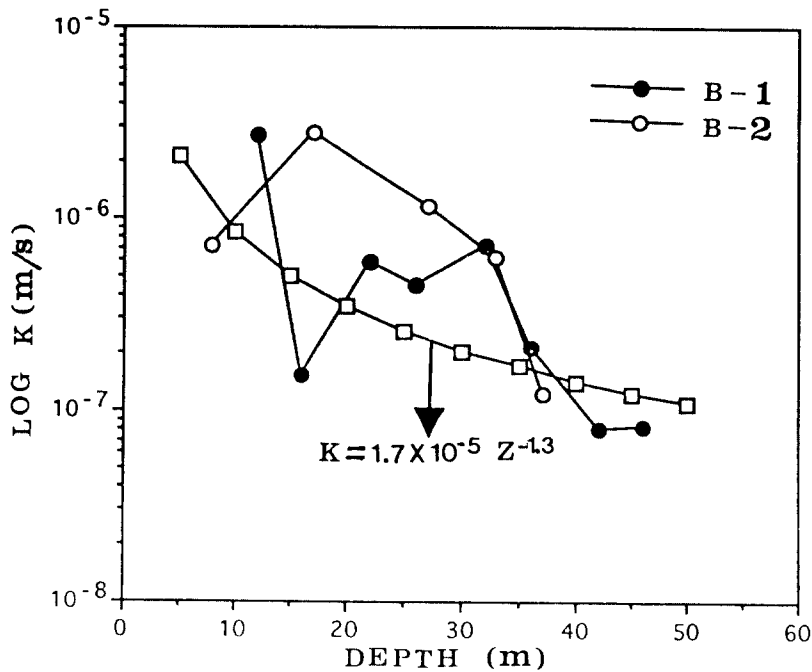
K_t : Transient Analysis
K_s : Steady-state Analysis

즉, EL.(-)200m~EL.±0.0m구역의 수리전도도는 $5.90 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 이고, EL.(±)0.0m~EL.(+)200m구역의 수리전도도는 $1.25 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 이며, EL.(+)200m~지하수면(Water Table)구역은 $6.50 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 이다.

일반적으로, 결정질암에서의 지하수면(Water Table)은 지표면의 지형적 굴곡상태와 유사하게 형성된다. 연구지역에서 지하수면은 대체로 고도가 높은 지역에서는 지표면하 20내지 40m에 위치한 것으로 예측되고 있으며 충적층이 발달된 저지대에서는 지표하 1~2m에 위치하고 있다. 연구지역내의 지하수위 등치선을 SURFER모형[5]을 사용하여 프로팅하면 그림 5와 같다. 또한 암반의 공극률은 편마암에 대한 기존의 여러자료들을 근거[6]로 하여 3%로 정하였다.



(b)



(c)

그림 3 조사공 B-1과 B-2의 간격 및 깊이별 수리전도도 분포[3]

3. 지하수 유동체계 분석

3.1 MODFLOW 지하수유동모형

연구지역의 지하수 유동체계를 해석하기 위해 미국의 지질조사소(U.S.G.S.)가 1988년도에 개발한 3차원 MODFLOW 모형[7]을 사용하였으며, 이 모형은 유한차분법을 이용하였고, 모형의 지배방정식은 다음과 같다[8].

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : 주축에 평행한 수리전도도 (LT^{-1})

h : 압력수두(L)

S_s : 비저류계수(L^{-1})

t : 시간(T)

수평의 행방향으로 Cell_{i,j,k}로의 유동은 Darcy의 법칙에 의해서 아래와 같은 식으로 표시된다 (그림 6).

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta C_i \cdot \Delta K_k \cdot \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{i-1/2}} \quad (3)$$

여기서, $KR_{i,j-1/2,k}$: 절점 i, j, k 와 $i, j-1, k$ 사이의 수평의 행방향 수리전도도(LT^{-1})

$\Delta C_i \cdot \Delta V_k$: Cell의 수평 행방향 면적

$\Delta r_{i-1/2}$: 절점 i, j, k 와 $i, j-1, k$ 사이의 거리(L)

마찬가지 방법으로, 즉 수평의 열방향으로 앞면에서 뒷면으로의 유동식과 수직 방향으로 윗면에서

아랫면으로의 유동식은 다음과 같다.

$$q_{i+1/2,i,k} = KC_{i+1/2,i,k} \cdot \Delta r_i \cdot \Delta V_k \cdot \frac{(h_{i+1,i,k} - h_{i,i,k})}{\Delta C_{i+1/2}}$$

$$q_{i,i,k-1/2} = KV_{i,i,k-1/2} \cdot \Delta r_i \cdot \Delta C_i \cdot \frac{(h_{i,i,k-1} - h_{i,i,k})}{\Delta V_{k-1/2}} \quad (5)$$

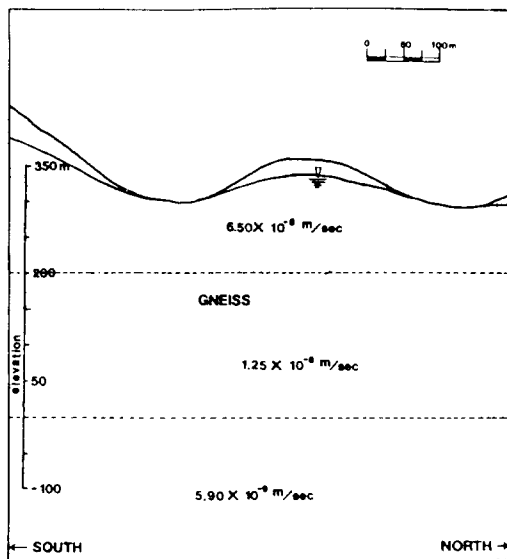


그림 4. AB단면의 지질, 지하수위 및 수리전도도

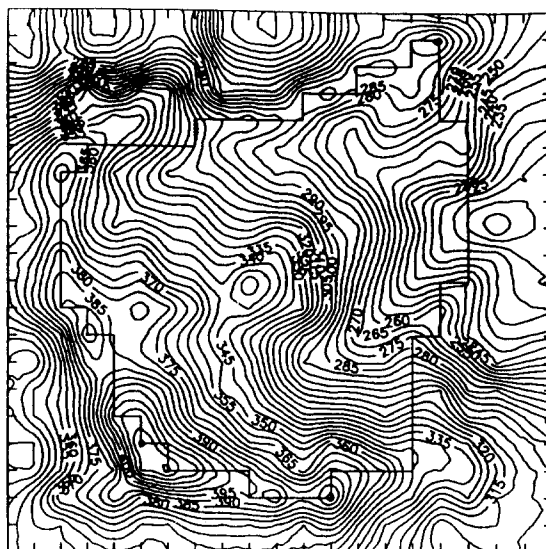


그림 5. 연구지역에서의 지하수위 등치선(m)

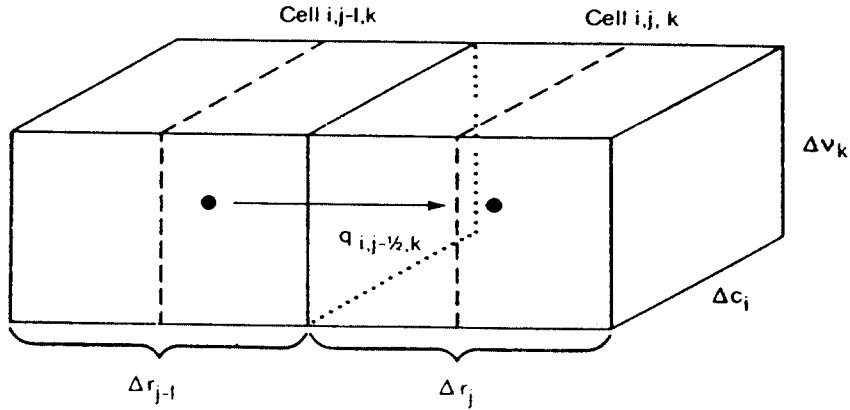


그림 6. Cell $i,j-1,k$ 로부터 i,j,k 로의 흐름

3.2 지하수 유동체계 분석

3.2.1 경계조건 및 유한차분망 작성

유한차분망의 윗면은 지하수면이고, 지하수면의 수두값은 해수면으로부터의 높이이다. 연구지역내의 지하수위 등치선을 근거하여 윗면의 각 Cell에서의 수두값을 정하였고 이것을 SURFER 모형을 사용하여 3차원으로 프로팅하면 그림 7과 같다.

유입된 강수가 사점미골과 잉울암골을 따라 흘러 합치는 동쪽의 유출구를 제외한 조사지역 주변의 모든 경계면은 지형학적으로 분수령을 이루므로 경계면의 수직방향으로의 유동량이 0인 불투수성 경계면으로 가정하였다. 하부경계면은 EL.(±)0m 되는 지점으로 수리전도도가 매우 작은 지역이기 때문에 불투수성 경계면으로 가정하였다. 유한차분망은 연구지역을 20개의 행과 18개의 열로 50m 간격으로 분리하여 360개의 Cell로 분할하였다. 연직방향으로는 EL.(+)450m에 위치한 윗면과 EL.(±)0m에 위치한 바닥면 사이를 50m의 간격으로 9층으로 분할한다. 그래서 연구지역에 대한 유한차분망은 3240개 Cell로 구성되며 각 Cell은 중심에 하나의 절점이 위치하고 그림 8과 같다.

3.2.2 수치 모형의 해석결과

앞에서 언급한 3차원 MODFLOW모형을 사용하여 정상류상태(Steady State)하에서의 지하수 유동체계를 분석하였다. 본 연구 지역을 구성하고 이

는 편마암은 열극을 포함하고 있는 이방성 매질이다. 그러나 열극체계에 대한 정확한 조사가 경제적인 여건과 지형적인 여건상 어렵기 때문에 암반을 다공성 매질로 가정하였다. 또한 연구 편의상 암반을 등방성 매질로 가정하여 수평과 연직 방향의 수리전도도는 앞에서 기술한 바와같이 동일한 값을 사용하였다. 또한 지하수면 위의 비포화지역에서의 유동은 무시하고 포화지역만을 계산하였다.

그림 9-그림 11은 연구지역내의 임의의 18개 지점에서 지하수면으로 유입된 물이 암반에서 유동하는 형태를 3차원 MODFLOW모형을 사용하여 계산하고 MODPATH 모형으로 프로팅한 것이다 [9]. 그림 9는 3차원의 유동로를 평면상에 투영했을 때의 유동형태이다. 각 유동로들은 연구지역내에서 양쪽으로 갈라져 위치한 개울 주변으로 유출되고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 Q방향으로 투영했을 때의 각 유동로를 표시한 것이며, 그림 11은 R방향으로 투영했을 때의 각 유동로를 표시한 것이다. 연구지역 내의 유동로중에서 A,B,C,D 유동로가 통과한 Cell의 갯수, 유동길이, 유동시간은 표 4와 같다.

또한 연구지역으로 강하하는 강수는 사점미골과 잉울암골을 통과하여 동쪽의 유출구로 흘러 나간다. 모형을 사용하여 연구지역내에서 유출되는 총 지하수 유출량을 모형을 사용하여 계산한 결과 307m³/day로 계산되었다.

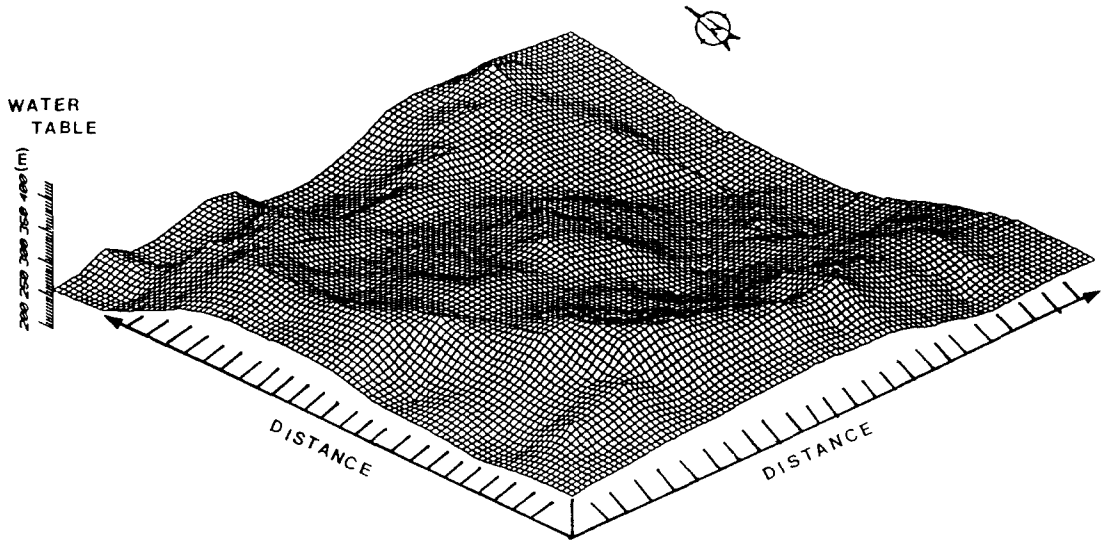


그림 7. SURFER Model로 Plotting한 3차원 지하수면

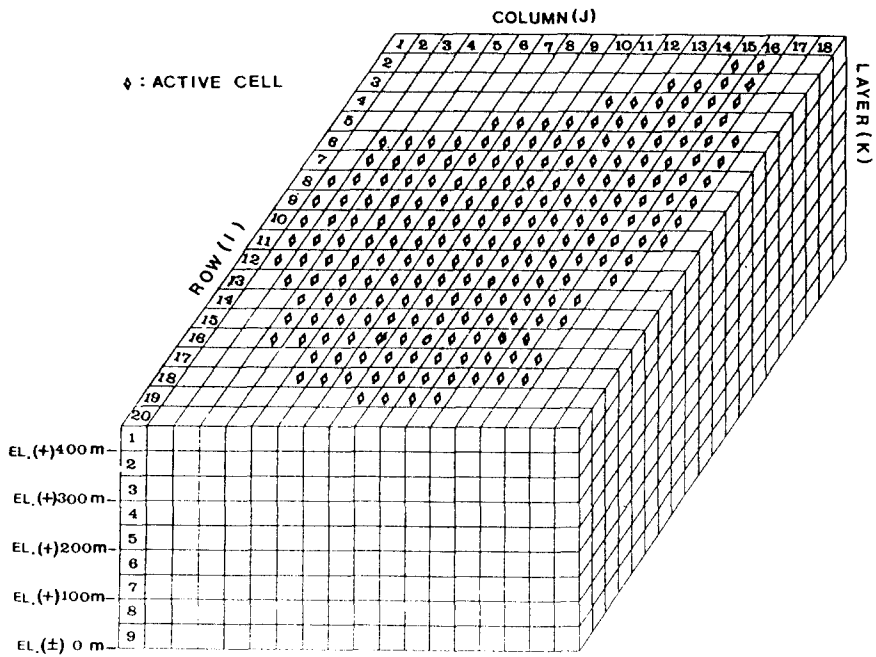


그림 8. MODFLOW Model에 적용된 유한차분망

표 4. 유동길이와 유동시간

유동로	통과한 Cell의 갯수	유동길이(m)	유동시간(년)
A	20	648	103
B	27	887	263
C	8	203	15
D	8	276	26

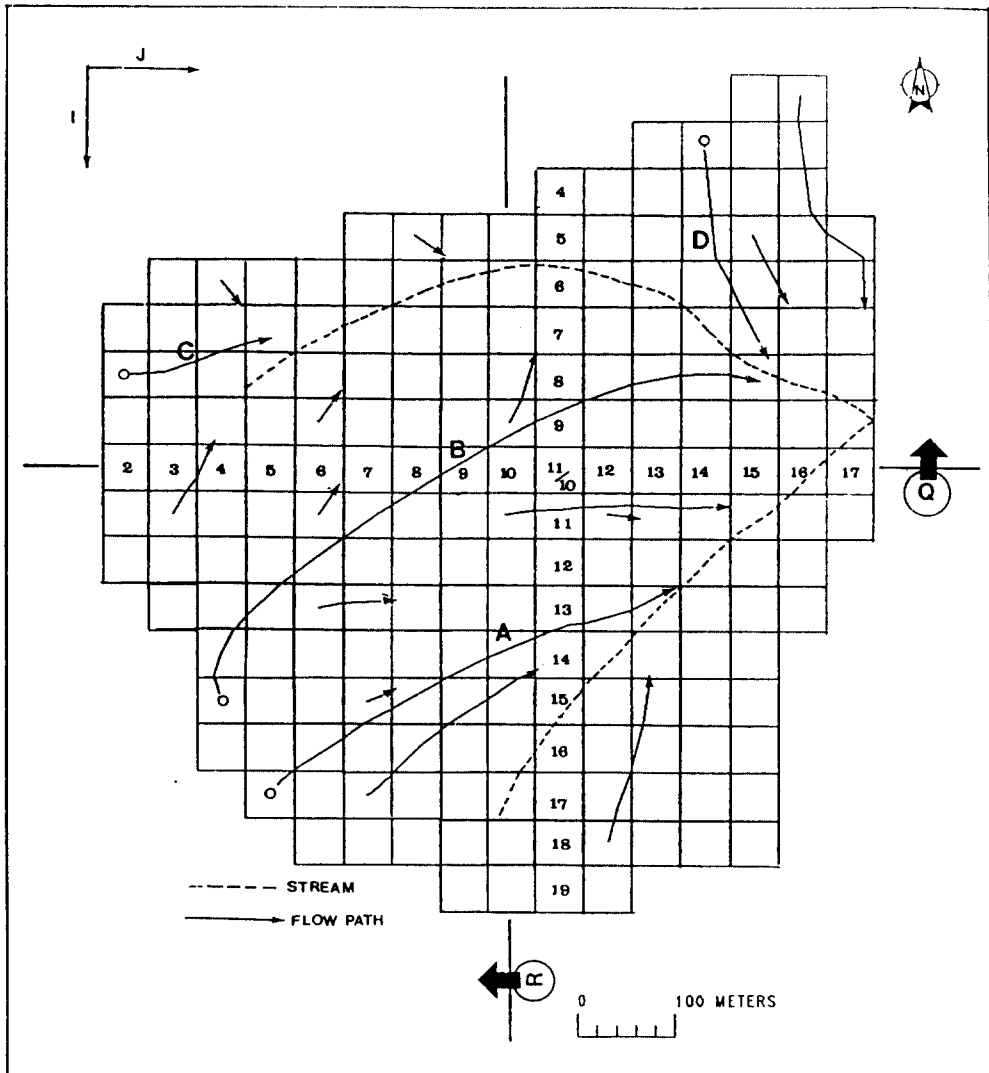


그림 9. MODFLOW Model로 계산된 유동로-평면도

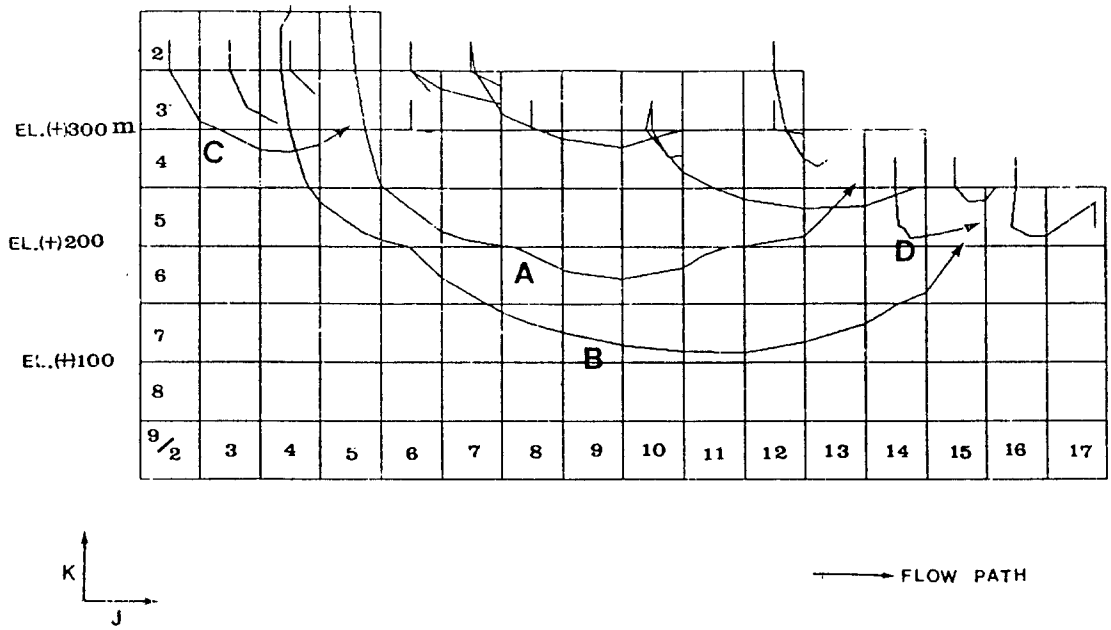


그림 10. MODFLOW Model로 계산된 유동로-㉑ 단면투영도

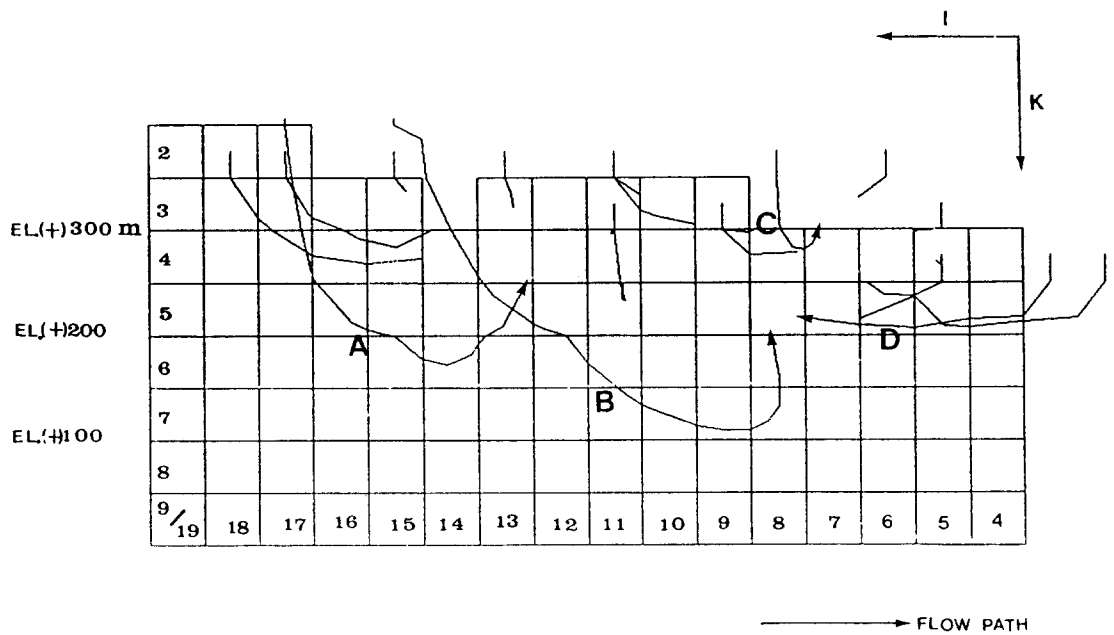


그림 11. MODFLOW Model로 계산된 유동로-㉒ 단면투영도

3.2.3 결과분석

연구지역내의 지하수면의 수두값은 유출구 지점에서 제일 낮은 EL.(+)215m이며 유동지역의 남서쪽 지점이 제일높은 EL.(+)425m이고, 대부분의 지역은 EL.(+)250m부터 (+)390m사이의 값을 가진다. 연구지역내에는 잉울암골과 사점미골의 두개의 개울이 위치하므로 유입된 강수는 그림 9에서와 같이 두개의 개울 주변으로 유출되고 이것은 개울을 통해 수두값이 제일 낮은 유출구 지점으로 흐른다.

그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 연구지역내의 지하수면으로 유입된 대부분의 강수는 지하수면 아래로 암반을 통해 100m 이상으로 침투하지 못하며 유동길이와 유동시간은 짧다. 또한 유동지역내의 지하수면으로 유입된 강수는 EL.(+)100m 이하의 심부로는 침투하지 못하는 것으로 나타났다.

수계경계 부근 4개 지점의 지하수면으로 유입된 강수가 암반을 통해 흘러들어간 후 다시 지하수면 밖으로 유출되는 것을 나타낸 유동로 A, B, C, D의 유동길이는 648, 887, 203, 276m이고 유동시간은 103, 263, 15, 26년으로 계산되었다. 여기서 유동로 A와 B의 유동시간이 유동길이에 비해 긴 이유는 수리전도도가 5.2배 작은 EL.(+)200m이하의 지역을 통과하기 때문이다.

4. 모형해석 결과에 대한 검증

4.1 실측 지하수 유출량에 의한 검증

삼광광산 주변의 사점미골과 잉울암골을 중심으로 분수계를 형성하는 연구지역내에 강하하는 강수는 사점미골과 잉울암골을 따라 동쪽의 유출구에서 합치되어 바위골로 흐른다.

1991-1992년 동안 갈수기인 3월, 5월, 10월에 6회에 걸쳐 매회 1일씩 총 6일간 연구지역 전체로부터 유출되는 지하수 유출량을 두 개울이 합치되는 지점 밑 10m아래에서 측정하였다(표 5). 지하수유출량은 유속계를 사용하여 측정하였으며 사용된 유속계의 유속계산은 아래 식을 사용하였다.

표 5 연구지역에서 유출되는 총지하수 유출량

단위 : m³/day

년도	3월	5월	10월
1991	328	357	340
1992	346	344	349

$$V = 0.13N + 0.011$$

N : 초당회전수

V : 유속(m/sec)

측정한 전체 연구지역에 대한 지하수 유출량의 평균값은 344m³/day이다. MODFLOW모형에 의한 유출량은 307m³/day이므로 실측지하수 유출량의 90%에 해당하는 것을 알 수 있다. 실측 유출량과 모형에 의한 유출량은 모두 불확실 인자를 포함하고 있기 때문에 본 연구에서는 이들 값의 평균 값인 325m³/day를 지하수 유출량으로 가정한다.

한 지역의 물수지(Hydrological Balance)는 정량적으로 다음과 같이 표시된다[10].

$$P = R + E + G$$

여기서, P : 강수량

R : 지표면 및 지표하 유출량

E : 증발산량

G : 지하수 유출량

표 6. 연구지역에서의 물수지

성분	수량(m ³ /day)	비율(%)
총 강수량	1619	100
증발산량	567	35
지표 유출량	727	45
지하수 유출량	325	20

지난 11년간(1981-1991) 연구지역 전역에 내린 일평균 강수량은 1619m³/day이다. 또한 일평균 증발산량은 567m³/day이고 일평균 지하수 유출량은 앞에서 기술한 것과 같이 325m³/day로 예상되며 이것은 일평균 강수량의 약 20%에 해당된다. 이것은 국내 총 강수량 중의 지하수함량 비율인 18%[11]와 거의 유사하다.

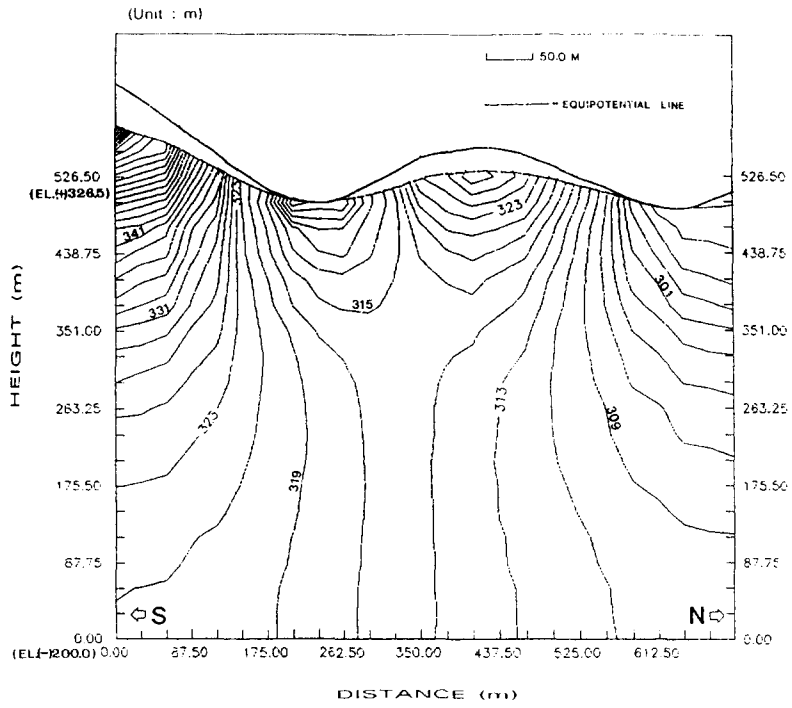


그림 12. TRAFRAP Model에 의한 수두분포체계

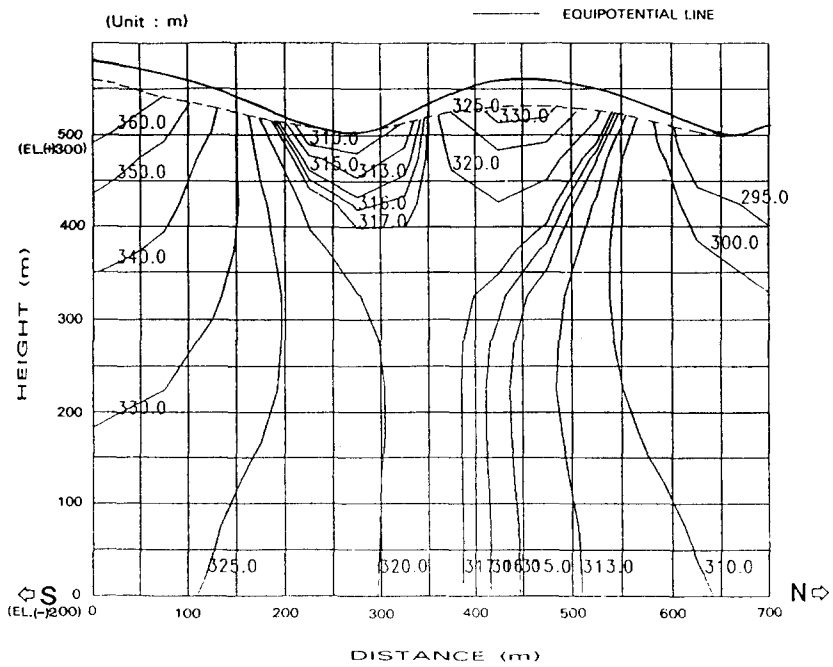


그림 13. MODFLOW Model에 의한 수두분포체계

4.2 TRAFRAP 모형에 의한 검증

TRAFRAP모형[12]은 1986년도에 미국의 Hol-comb연구소와 Hydrogeologic Inc.가 공동으로 개발한 모형으로 지하수 유동과 용질이동을 해석하는 2차원 모형이다. 이 TRAFRAP모형을 사용하여 그림 4의 AB단면을 해석한 결과를 앞의 모형에 의한 해석 결과와 비교하였다. 남쪽과 북쪽 연직경계면은 지형학적으로 분수량을 이루므로 유동량을 0으로 가정한 불투수성 경계면으로 가정하였고, 하부경계면은 EL.(-)200m 되는 지점으로 수리전도도가 상대적으로 매우 작은 지역이기 때문에 불투수성 경계면으로 가정하였다. TRAFRAP 모형으로 구한 수두분포값의 등치선을 프로팅한 결과는 그림12와 같다.

그림 4와 같은 단면에 대하여 MODFLOW모형을 사용하여 수두분포값을 계산하고 결과를 프로팅한 것은 그림 13과 같다. MODFLOW와 TRAFRAP모형에 의한 결과를 비교하면, 수두분포 값에 대한 오차는 5% 미만이다. 그러므로 동일한 입력자료를 입력하였을 때 두 모형은 거의 같은 결과를 보이는 것을 알 수 있고 MODFLOW 모형에 의한 해석결과의 신빙성을 뒷받침한다.

5. 결 론

1. 3차원 MODFLOW모형을 사용하여 잉울암골주변에서의 지하수 유동특성을 해석한 결과는 아래와 같다.
 - 1) 연구지역내의 지하수면으로 유입된 강수는 개울주변으로 유출되며 해수면상 EL.(+) 100m 이하의 암반 심부로는 거의 침투하지 못한다.
 - 2) 수계경계 부근 4개의 지점으로 유입된 강수의 유동로 A, B, C, D의 유동시간은 각각 103년, 263년, 15년, 26년으로 계산되었다.
 - 3) 이 모형을 사용하여 연구지역 내에서의 총 지하수 유출량을 계산한 결과는 307m³/day 이다.

- 4) 연구지역 내의 암반의 구성광물인 편마암에서 지표면으로부터 심도에 따른 수리전도도는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$K=1.7 \times 10^{-5} \times Z^{-1.3} \quad Z: \text{지표면으로부터의 깊이}$$

2. 위 결과의 신빙성을 검증하기 위해

- 1) 실측지하수 유출량과 MODFLOW모형으로 계산한 지하수 유출량 값을 비교한 결과 오차는 약 10%로 나타났다.
- 2) 동일한 단면에 대해 MODFLOW모형과 TRAFRAP모형을 사용하여 계산된 수두분포 값을 비교한 결과 오차는 5% 미만이다.

6. 참 고 문 헌

1. 엄상호, 이민성, “대흥 지질도폭 및 설명서”, 국립지질조사소, 1968.
2. “충남, 서북부 지하수조사 보고서”, 한국수자원공사, 1992.
3. 안종성 외, “암반에서의 지하수 유동과 수문 및 화학적 특성 연구”, 과학기술처, KAERI II/PR-2/90 pp.56, 1990.
4. Carlsson, L., Winberg, A., and Arnefors, J., “Hydraulic modeling of the final repository for reactor waste”, SFR 86-03, pp.164, 1986.
5. “SURFER”, U.S. Golden Software, Inc.
6. Wiborgh, M. and Lindgen, M., “Database for the radionuclide transport calculations for SFR”, SFR 87-09, pp.64, 1987.
7. McDonald, Michael G. and Harbaugh, Arlen W., “A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model”, U.S. Geological Survey, 1988.
8. Rushton, K.R., Redshaw, S.C., “Seepage and groundwater flow-numerical analysis by analog and digital methods”, John, Wiley and Sons, 1979.
9. Pollock, David W., “Documentation of computer programs to compute and display path lines using results from MODULAR model” U.S. Geological Survey, 1990.

10. 이원환, “수문학”, 문운당, 1989.
11. 한정상, “국내 지하수 자원의 합리적 관리 방안”, 대한 광산 지질 학회, 대한지질학회 공동발표집, pp.2, 1992.
12. Huyakorn, P.S., White, H.O.Jr., and Wadscoorth, T.D., “A two-dimensional finite element code for simulation fluid flow and transport of radionuclides in fractured porous media with water table boundary conditions”, Hydrogeologic, Int., 1987.

(접수 : 3월 17일)