

지하 석유비축기지 주변의 지하수 개발에 의한 수리지질학적 영향의 수치해석 연구

A Study of Numerical Analysis on Hydrogeological Influence by Groundwater Development around Underground Oil Storage Cavern

정 현 영 (Hyun Young Jung)

한국석유공사 석유비축처

송 무 영 (Moo Young Song)

충남대학교 지질학과

이 경 주 (Kyung Ju Lee)

한국석유공사 석유비축처

요약 / ABSTRACT

서울 근교의 화강편마암지역 지하 석유비축기지 주변 지하수계 모델링 연구를 통하여, 기지 인근에서 지하수를 개발할 때의 영향 및 지하수 개발의 악영향 저감을 위한 수벽공 설치의 효과 등을 파악하고, 실제 설치 후의 영향을 측정하여 모델링 결과와 비교 분석하므로써 기지의 관리 및 운영에 참고하고자 하였다. 심부 지하수를 개발한 경우의 기지 주변의 지하수 유동체계 분석, 그리고 이 개발 위치와 기지 사이에 수벽공을 설치했을 경우의 유동체계를 MODFLOW 수치해석방법으로 분석하였다. 기지 주변 관측공의 실제 지하수위는 EL.+30~60m 범위에서 변동하며, 모델링 결과는 EL.+20~50m 범위에서 변동하여 유사한 양상을 보이고 있다. 지하수 개발에 의해 기지 주변의 수위가 하강하였다가 수벽설치 후에 회복되었음을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다. 지하지질구조 및 수리지질 요소를 적절히 입력하고 효과적인 모델링 연구를 수행하여 기지의 운영에 기여하였음을 확인하였다.

주요어 : 지하수계, 모델링, MODFLOW, 수치해석, 수벽공

Through the modeling study on the groundwater flow system around the underground stockpile site of crude oil near Seoul, we carried out the research on the influence of the groundwater yield near the site, the effect of the water curtain construction in order to reduce the influence of water yield, and the realized case study by measuring the water level change after the construction of the water curtain. For the simulation of the water yield and the water curtain, the numerical analysis code, MODFLOW

has been utilized. Groundwater levels of the observation wells which were established to observe the hydraulic head around underground oil storage cavern of the study area have been changed in the range of from EL.+30 to +60 meter, while the simulation study revealed that groundwater levels changed in the range of from EL.+20 to +50m. The hydrogeological condition of the underground oil storage cavern becomes stable by injection water to maintain the groundwater level around the cavern. The result shows the proper input of the hydrogeological factors helps the management to be effective for the oil stockpile site.

Key Words : groundwater system, modeling, MODFLOW, numerical analysis, watercurtain borehole

서 론

지하 공동에 석유를 저장하는 원리는 공동 주변 암반의 공극수압이 공동 내 가스압 보다 항상 높게 유지되도록 자연적 또는 인위적으로 조정하여 지하수가 공동 주변 암반에서 공동 내부로 지속적으로 흐르도록 하는 것이다(B. Åberg, 1977; 이정주, 1996). 따라서 기지 인근 지하수계의 유지 및 관리는 수리지질학적 안정성에 따른 석유저장을 위해 필수적이다. 그러나 최근 기지 인근에서 지하수 개발 및 지하 구조물이 권장되어 건설되고 있으며 이러한 외부 요인으로 인해 발생하는 지하수계 교란과 수리지질학적 안정성 저해요인을 사전에 방지하고자 수치해석방법을 사용하여 지하수계에 대한 영향범위를 산정하고, 실제 지하수 개발로 인해 발생한 수리지질학적 영향과 이 영향을 제거하기 위하여 설치한 수벽공의 효과를 확인하는 것을 연구의 목표로 설정하였다. 기지 건설시 암반의 지질학적, 지질공학적, 수리지질학적 특성을 파악하기 위해 수행한 지질 및 시추조사 결과자료에 의하여 투수성 구조의 발달상태를 확인하고, 수리시험 결과자료의 분석을 통해 수치해석 수행을 위한 파라미터를 도출하였다. 수치해석방법으로는 MODFLOW를 이용하여 모델링을 수행하였으며 그 결과를 기존의 문헌 및 자료와 비교 검토하였다.

지형 및 지질

연구지역의 위치는 서울시와 경기도 일대를 포함하며 1.7km×2.5km의 면적에 해당된다. 지형은 북서쪽에 위치한 해발 297m 산 정상에서 남동쪽의 한강을 향해 발달된 급사면에서 구릉성사면으로 전

이하는 특성을 보인다. 한강 본류에 이르는 소규모 계곡을 따라 고가의 하성퇴적층이 형성되어 있다. 지질은 선캠브리아기 경기편마암복합체의 일부인 호상편마암이 남쪽 일대에 분포하며 중생대 쥐라기에 관입한 대보화강암은 연구지역 전역에 걸쳐 저반 형태로 발달하고 있다. 연구지역의 지질도는 Fig. 1과 같다(동력자원연구소, 1981; 선경건설(주) 부설연구소, 1997).

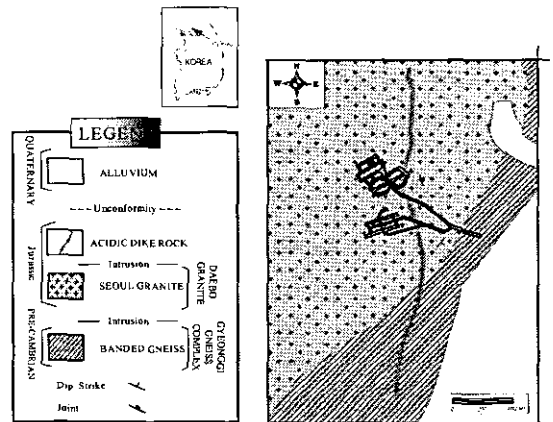


Fig. 1. Geological map of the study area.

계곡부에 대한 지질조사 결과 단층흔적이 발견되지 않았으며, 연구지역에 발달하고 있는 절리는 N5~10°W, N60~70°W, N40~50°E 방향이 가장 우세하고, 절리 간격은 대부분 0.5~2.0m 정도이다. 암맥으로는 산성암맥, 그리고 소규모의 염기성암맥 등이 발달하고 있으며, 수리적 영향요인으로 추정되는 산성암맥은 약 10~15m 두께를 보이고 있다(한국석유개발공사, 1991; Geostock, 1977).

지하 지질조사 결과

암반의 지질공학적 특성

연구지역의 지질학적 특성을 파악하고 모델링을 수행하기 위한 파라미터를 도출하기 위해 기지 건설시 굴착한 OB-1~4호공에 대한 시추자료를 활용하였으며, 제원은 Table 1과 같다(한국석유개발공사, 1991). 표토층은 기반암의 풍화잔적토로 구성되어 있고 심도는 0.3~1.0m에 불과한 것으로 확인되었다. 시추조사 결과 OB-1호공은 심도 6m부터 기반암이 분포하고 있으며 23.0~24.2m 구간에 발달하고 있는 염기성암맥을 제외하고는 신선한 화강암으로 이루어져 있다. OB-2호공은 심도 42.0~72.8m 구간에서 암회석을 띠는 산성암맥이 분포하고 있으며, 본 암맥과 심도 128.8~130.6m 구간에 발달하고 있는 소규모 염기성암맥을 제외하고는 전구간이 화강암으로 이루어져 있다. OB-3호공에서 표토층의 두께는 1.4m에 불과하며 전구간이 화강암으로 구성되어 있다. OB-4호공은 심도 86.8~88.0m 구간에서

염기성암맥이 분포하고 있는 것이 확인되었다.

수리시험

연구지역의 수리지질학적 특성을 규명하기 위하여 시추조사공 모든 공을 대상으로 현장투수시험의 수압시험을 실시한 결과를 분석하였고, 시험구간에서의 수리전도도 및 투수량계수를 산출하고 Table 2에 나타내었다.

현장투수시험 후 간이양수시험에 의한 대수성시험을 OB-3~4호공에서 실시하였고 Table 3에서 비교하였다. 산출된 OB-3호공 인근 파쇄매체의 투수량계수는 $1.93 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$, 저류계수는 1.67×10^{-6} 이고, OB-4호공은 각각 $1.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ 과 7.47×10^{-7} 이다. 시추공의 현장투수시험과 대수성시험 결과분석을 통해 산출된 수리전도도, 투수량계수, 저류계수, 비산출량 등은 Table 4에 정리하였다.

Table 1. Specification of boreholes.

hole number	elevation (EL,m)	bottom (EL,m)	length (m)	inclination (°)	initial groundwater level(EL,m)
OB-1	146.75	-40.25	187	90	63
OB-2	121.17	-40.83	162	90	57
OB-3	108.12	-41.88	150	90	61
OB-4	86.26	-48.74	135	70	73

Table 2. Result of the packer test of boreholes for hydraulic conductivity.

hole number	test length(m)	hydraulic conductivity(m/sec)	transmissivity(m ² /sec)
OB-1	181.0	1.45×10^{-8}	2.62×10^{-9}
OB-2	159.8	9.64×10^{-8}	1.54×10^{-9}
OB-3	147.5	1.01×10^{-7}	1.49×10^{-9}
OB-4	130.0	3.86×10^{-8}	5.02×10^{-9}

Table 3. Comparison of results of packer test and pumping test for hydrogeologic properties.

hole number	test depth (m)	packer test		pumping test	
		hydraulic conductivity (m/sec)	transmissivity (m ² /sec)	hydraulic conductivity (m/sec)	transmissivity (m ² /sec)
OB-3	147.5	1.01×10^{-7}	1.49×10^{-9}	1.31×10^{-7}	1.93×10^{-9}
OB-4	130.0	3.86×10^{-8}	5.02×10^{-9}	1.19×10^{-8}	1.55×10^{-9}

Table 4. Result of the hydraulic tests in boreholes.

content	value
hydraulic conductivity of rock mass(m/sec)	$1.19 \times 10^{-8} \sim 1.31 \times 10^{-7}$
transmissivity of rock mass(m/sec)	$1.55 \times 10^{-9} \sim 5.02 \times 10^{-9}$
hydraulic conductivity of acidic dyke(m/sec)	$8.49 \times 10^{-4} \sim 7.46 \times 10^{-3}$
specific storage(1/m)	$7.47 \times 10^{-7} \sim 1.67 \times 10^{-6}$

외부의 수리지질학적 영향요인

개요

기지 인근 ○○지역에서 개발한 시추공 4공 (Table 5)에서 지하수를 채수하므로써 기지 주변 수위가 하강하는 등 주된 수리간섭 현상을 일으키는 것을 확인하였고, 이에 지하수 유동로로 추정되는 산성암맥을 관통하도록 수벽공 5공을 설치하였다. 연구지역의 수리지질학적 영향인자인 채수공, 수벽공 등의 전반적인 분포를 Fig. 2에 나타내었다.



Fig. 2. Location map of pumping wells and injection wells in the study area.

Table 5. Specification of pumping wells.

hole number	elevation (EL.m)	bottom (EL.m)	length (m)	initial groundwater level(EL.m)	pump elevation (EL.m)
W1	74.0	-743.0	817	16.00	-526.0
W2	77.5	-434.5	512	17.50	-322.5
W3	60.5	-652.5	713	5.21	-509.5
W4	79.5	-590.5	670	16.47	-456.5

추적자시험

지하수 유동로로 추정되는 산성암맥의 수리분산 특성을 파악하고 OW-2호공의 시추위치를 확정하기 위하여 1차 추적자시험을 실시한 결과(선경건설(주)부설연구소, 1996), W2호공의 경우 추적자의 상대농도는 주입 후 5일 경과할 때 최대값($C/C_0=0.0019$)에 도달했으며, 공간적인 추적자의 분포양상은 Fig. 3과 같다. 채수공이 기지 주변의 지하수계와 직접적으로 연관되어있는지 여부를 검증하기 위하여 2차 추적자시험을 실시한 결과, 초기상대농도가 0.004인 OW-2호공에서 주입 후 29일 경과했을 때 최대값($C/C_0=0.040$)에 도달하는 것으로 관측되었으며, 초기상대농도가 0.0006인 W2호공에서는 주입 후 36일이 경과했을 때 최대값($C/C_0=0.010$)에 도달하는 것으로 관측되었다. 공간적인 추적자의 분포양상은 Fig. 4과 같다. 이로써 관측공과 채수공이 산성암맥을 통하여 직접적으로 연결되어 있으며 채수에 의한 수리간섭영향을 받을 수 있음을 확인하였다.

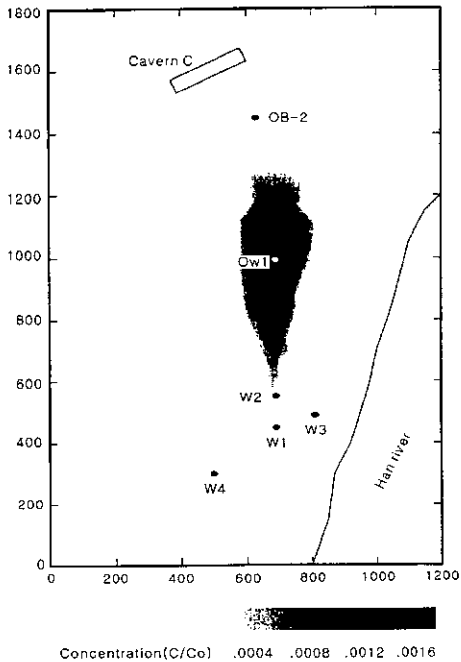


Fig. 3. Distribution of NaCl tracer injected in the borehole OW-1 in the study area.

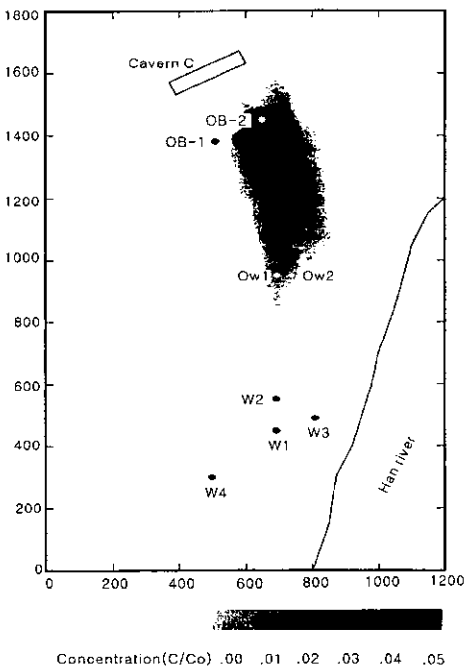


Fig. 4. Distribution of NaCl tracer injected in the borehole OB-2 in the study area.

추가 수벽공 설치

현장검증시험을 통해 주된 지하수 유동로로 판단된 산성암맥에 의한 수리간섭영향을 배제하고자 기존 OW-1~2호공 외에 수벽공 3공을 추가로 설치하고 주입시설로 활용하였으며, 추가 수벽공의 제원은 Table 6과 같다(지오택컨설턴트(주), 1998).

Table 6. Specification of injection wells.

hole number	elevation (EL.m)	bottom (EL.m)	length (m)	initial groundwater level(EL.m)
OW-1	84	-80	164	73.2
OW-2	84	-86	170	73.4
OW-3	84	-121	205	74.2
OW-4	84	-31	115	73.5
OW-5	79	-151	230	73.0

수리지질 특성

관측공의 지하수위 변화

공동 기밀조건에 만족되는지의 여부를 확인하기 위해서는 공동 주변에 여러 개소의 지하수 관측공을 설치하고 수위 변동사항을 수시로 관측하여 기준수위 이하로 하강하지 않도록 관리해야 한다. 지하수는 치밀한 암반에 분포하는 불연속면에 한정되어 있으므로 인근 외부에서의 지하수 개발 등으로 인한 적은 량의 지하수 유출도 큰 폭의 수위하강을 유발할 것으로 판단된다(이경주와 정현영, 1998).

OB-1호공은 C공동 굴착 이전 EL.+62m이었으나 공동 굴착 완료시점인 '93년 11월에 약 10m 정도의 급격한 수위하강 후 지속적으로 하강하였는데, 이는 '93년 이후 인근 지역에서의 채수공 시추 및 양수시험 등 지하수 채수에 기인하는 것으로 사료된다. '94년 이후 주로 갈수기 및 우기 등에 따라 수위가 변동하며 '98년 이후 수벽공 가동 등으로 인해 점진적으로 소폭 상승하는 경향을 나타내었다 (Fig. 5).

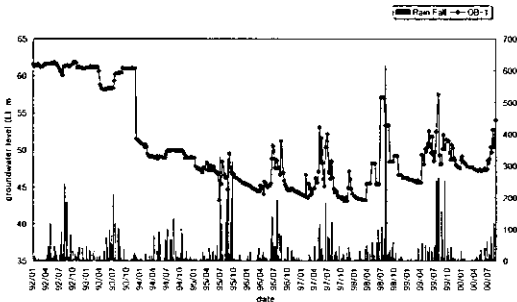


Fig. 5. Groundwater level fluctuation of the borehole OB-1.

OB-2호공은 인근의 지하수 채수로 인한 수리간섭영향으로 수위가 하강하던 공이었으나 수벽공 설치로 수위를 회복하였다. C공동 굴착 이전 EL.+51m이었으나 굴착이 진행됨에 따라 점차 하강하였고, 굴착 종료시점인 '93년 11월에 지수작업으로 수위는 약 EL.+44m로 안정화되면서 일정기간 유지하였다. 굴착 완료 후 약 2m의 수위하강이 3개월간 지속되었으며 '94년 2월 약 6m정도 급격한 수위하강이 있는 후 '96년 11월까지 지속적으로 하강하였다. 이는 채수로 인해 산성암맥 주변부를 통해 지속적으로 채수공으로 지하수가 유동함에 기인한다 (Fig. 6).

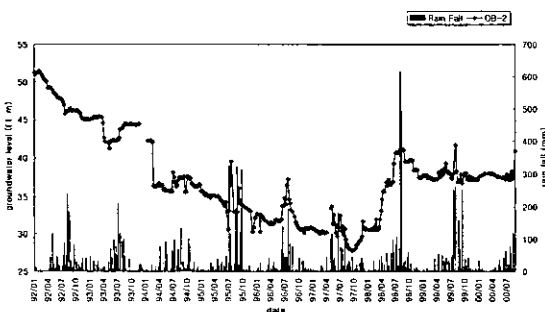


Fig. 6. Groundwater level fluctuation of the borehole OB-2.

OB-3호공은 C공동 굴착 이전 EL.+60m이었으나 굴착이 진행됨에 따라 점차 하강하여 굴착 종료시점인 '93년 11월에 EL.+55m로 안정된 수위를 나타내다가 약 5m의 급격한 수위하강을 보인 후 지속적인 하강추세를 보였다. '98년 이후 수벽공을 가동함

에 따라 점차적인 상승추세를 보이고 있다(Fig. 7).

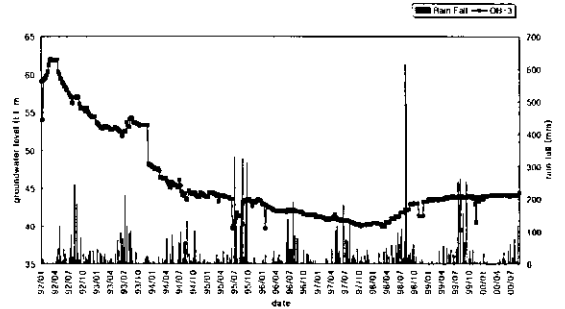


Fig. 7. Groundwater level fluctuation of the borehole OB-3.

OB-4호공은 C공동 굴착 이전 EL.+55m이었으나 굴착이 진행됨에 따라 점차 하강하여 굴착 종료시점인 '93년 11월에 EL.+28m까지 하강하였으며, 30여일간 수위가 회복되다가 다시 EL.+12m까지 급격한 수위하강을 보인 후 점차 상승하였다. 본 공은 주로 우기 및 갈수기 등의 계절적인 영향을 받아 수위가 변동하며 전체적으로 일정범위의 수위를 유지하고 있다(Fig. 8).

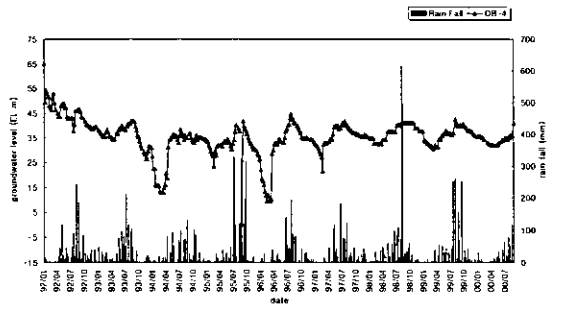


Fig. 8. Groundwater level fluctuation of the borehole OB-4.

공동의 주입수량 및 삼출수량 분석

기지 주변의 수위를 유지하고 석유류를 안전하게 저장하기 위해 공동 상부에 인위적인 수벽공을 설치하여 용수를 주입하며 이는 압반 내의 불연속면을 따라 공동으로 누수되어 삼출수로 산출된다. '95년부터 '00년 9월 현재까지의 C공동 주입수량과 삼출수량은 113~170m³/day와 132~288m³/day이

다. 기존공동의 경우 지하수 채수에 의한 기지 주변의 수위하강 및 주입수량의 증가는 관찰되지 않았으며, 이는 C공동 굴착시 기존공동과의 수리간섭을 방지하고자 설치한 갱내 수직수벽공의 용수 주입으로 지하수계가 분리되어 있기 때문으로 추정된다. C공동의 수문평형을 분석해 보면, '96년 4월은 지하수 채수로 인해 각 관측공의 수위가 최저점인 시기이며, 이때의 삼출수량은 약 200m³/day이고 주입수량은 약 150m³/day을 유지하고 있다. 삼출수량과 주입수량의 차인 50m³/day는 본 지역의 강우 등 자연함양량으로 보충되고 있는 것으로 추정된다. 이로부터 기지의 수문평형은 안정되어 있다고 사료되며, 각 관측공의 수위하강에는 관계가 없음을 알 수 있다.

지하수계 수치모델링

사용된 수치해석 프로그램

본 논문에서는 미국지질조사소(U.S. Geological Survey)에서 개발한 유한차분법의 MODFLOW를 사용하였다. MODFLOW에서는 포화된 다공질 매질을 통하여 일정한 밀도를 유지하며 이동하는 3차원적인 지하수 유동을 식 (1)과 같은 편미분 방정식으로 표현할 수 있다(한정상, 1998).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] \pm W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 은 수리전도도 텐서의 주 성분, h 는 전 지하수두, W 는 모델링 영역 내로의 공급원 및 배출원, t 는 시간, 그리고 S_s 는 비저류계수를 의미한다. MODFLOW에서 모델링을 수행하기 위해 공동, 수벽공, 채수공 등을 포함하도록 격자간격을 설정하고 세분화된 격자단위(cell)에 수리시험 결과분석을 통해 얻어진 수리특성인자를 이용하여 초기 및 경계조건을 입력하였으며, 유한차분식에 의해 계산하고 보정을 실시한 후 결과를 도출하였다.

개념모델 및 격자 설정

연구지역과 같이 절리 등 불연속면이 분포하는 암반에서 지하수 유동은 주로 절리면을 따라 일어난 것으로 추정되며, 이러한 유동을 개개의 절리를

고려하여 해석하기란 거의 불가능하므로 암반을 전체적인 수리특성에 따라 연속체로 가정하여 Fig. 9에서와 같이 개념모델을 만들고 그 영향을 수치해석에 반영시켰다(한정상과 한찬, 1999). 연구지역의 격자는 가로 1,700m, 세로 2,500m의 범위로 설정하였으며, 118행×144열×23층의 격자단위로 세분하였다(Fig. 10).

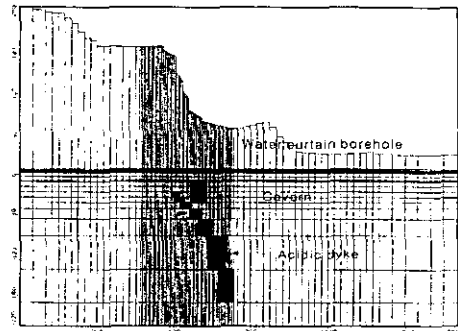


Fig. 9. Conceptual model of hydrogeological factors in the study area.

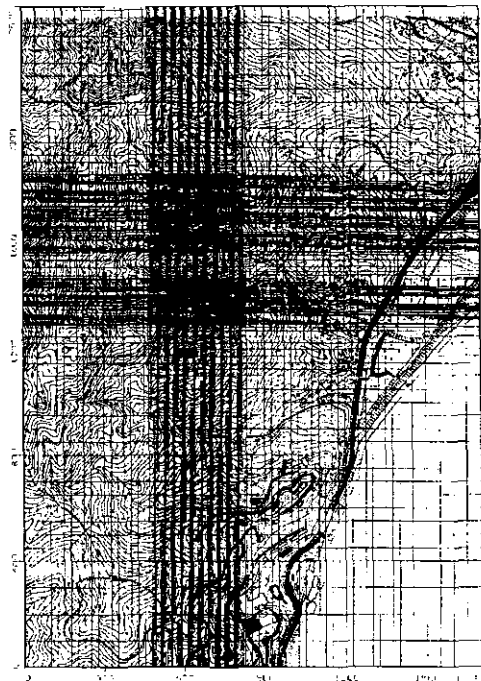


Fig. 10. Meshes for the groundwater system modeling in the study area.

초기 및 경계조건 입력

수리시험 결과분석을 통해 도출된 자료를 이용하여 초기조건을 입력하였다(Table 7). 모델링에서 지배식만을 가지고는 특수한 물리적인 영역을 충분히 서술할 수 없기 때문에 외부 수리특성인자에 대한 추가적인 정보를 제공해야만 한다(한정상, 1999). 공동의 경우 공동표고, 유종 비중, 대기압 등을 고려하여 종속수두경계(constant head boundary)로 입력하였다. 수벽공은 EL.+6m 지점에서 공동 상부영역을 포함할 수 있는 범위를 주입압력 및 시설표고를 고려하여 종속수두경계로 입력하였다. 한강은 연구 지역에서 연속적 선형적인 형태가 아닌 남동쪽의 한 부분이므로 강 패키지(river package)로 사용하지 않고 종속수두경계로 입력하였다. Table 8과 같이 경계조건을 입력하였으며, 외부의 수리지질학적 영향요인이 존재할 경우의 지하수계를 모델링하기 위한 채수공과 수벽공 자료를 Table 9와 같이 입력하였다.

Table 7. Input data of the initial condition in the groundwater system modeling.

content		value
hydraulic conductivity (m/sec)	rock mass	$1.19 \times 10^{-8} \sim 1.31 \times 10^{-7}$
	acidic dyke	$8.49 \times 10^{-4} \sim 7.46 \times 10^{-3}$
specific storage(1/m)		$7.47 \times 10^{-7} \sim 1.67 \times 10^{-6}$
specific yield		5.0×10^{-4}

Table 8. Input data of the boundary condition in the groundwater system modeling.

content		value
Constant Head Boundary	river	10
	cavern A, B	-10.65625~-14.59375
	cavern C	-10.78750~-15.51250
	water curtain borehole	16.2
recharge		120

Table 9. Input data of pumping and injection wells in the groundwater system modeling.

hole number	elevation (EL.m)	bottom elevation(EL.m)	pumping rate(m ³ /day)	
pumping well	W1	74.0	-743.0	34.87
	W2	77.5	-434.5	77.71
	W3	60.5	-652.5	41.30
	W4	79.5	-590.5	30.34
injection well	OW-1	84	-80	36.31
	OW-2	84	-86	36.31
	OW-3	84	-121	36.31
	OW-4	84	-31	36.31
	OW-5	79	-151	36.31

보정

지하지질조사 결과분석을 통해 투수량계수와 같은 수리특성인자는 이미 산출되었기 때문에, 본 논문에서는 모델의 보정을 위해 함양량만을 고려하였으며, 이때 투수량계수는 고정시키고 실제관측값과 모델결과값을 비교하면서 함양량을 조정하여 모델링에서의 수위를 실제수위와 일치시켰다. 최초 보정에서는 함양량을 6년간 연평균 강우량 약 1,500mm의 10%인 150mm로 입력하였고, 실제수위 관측값과 유사할 때까지 감소시켰다. 산성암맥의 영향을 가장 많이 받는 것으로 추정되는 관측공 OB-2호공의 수위를 기준으로 일치시켰으며, 보정 실시 결과 함양량을 120mm로 입력시킬 때 관측공 수위와 가장 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

지하수계 수치모델링 해석 결과

외부로부터 수리지질학적 영향이 없는 경우

외부로부터 수리지질학적 영향요인이 없는 경우 지하수계는 대부분 수리전도도가 매우 높은 공동이나 지하수 배출지역으로 일정수위를 유지시키는 한강으로 유동하는 양상을 보였다. Fig. 11과 12는 외부로부터 수리지질학적 영향요인이 없는 경우 수치 해석 결과 나타난 등수위선(equipotential contours),

지하수 유선방향(groundwater flow direction)을 나타내고 있다. 기지를 중심으로 타원 형태의 등수위선을 형성하고 있으며, 지하수는 수리전도도가 높은 공동으로 누수되므로 기지에서 멀어질수록 수위가 점차 상승하는 양상을 보이고 있다. 지하수계 영향 범위 산정을 위해 MODPATH의 입자추적법을 사용하였으며, 이는 각 입자의 유선범위를 계산하여 영향범위를 산정한다(한국석유공사, 1999; Geostock, 1993; 김경수, 2000). 연구지역의 지하수계 영향범위(Fig. 13)는 공동을 중심으로 약 400m 이내이며, 이 지역 내에서의 지하수를 채수하거나 지하 구조물을 건설할 경우 수위하강과 지하수계의 변형을 유발하여 공동의 수리지질학적 안정성을 저해시킬 것으로 추정된다.



Fig. 11. Equipotential contours, with no influence of OW and W boreholes.

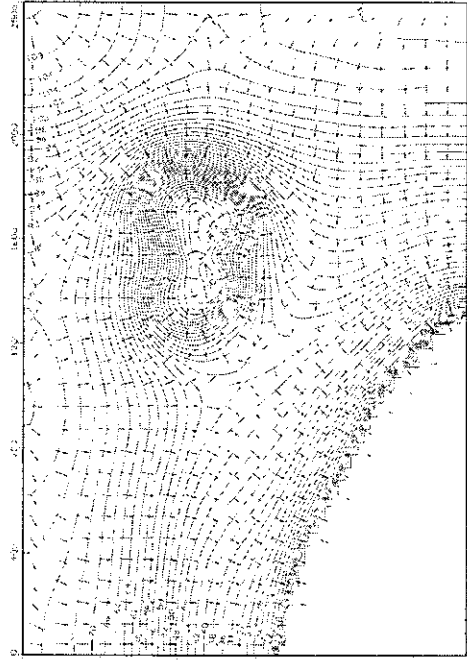


Fig. 12. Directions of groundwater flow, with no influence of OW and W boreholes.

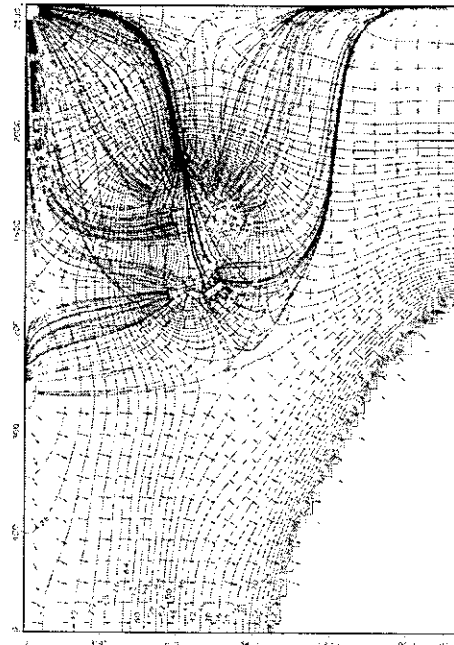


Fig. 13. Particle tracking, with no influence of OW and W boreholes.

기지 인근에서 지하수를 채수한 경우

기지 인근에서 지하수 채수와 같은 외부로부터 수리지질학적 영향이 있는 경우를 모델링하기 위해 기지 남측에 채수공 4공을 설치하고 수리간섭 현상을 관찰하였다. 모델을 통해 채수한 결과(Fig. 14, 15) 기지와 채수공 사이에 존재하는 상대적으로 수리전도도가 높은 산성암맥이 지하 수로(channel) 역할을 하여 지하수가 채수공으로 유동하고 수위하강을 초래하였으며, 결국 기지 주변의 지하수두가 하강하는 것으로 추정되었다. 이는 함양구역의 축소와 지하수 포장량이 줄어드는 것을 의미하므로 장기적으로 지하수의 고갈과 기지의 수리지질학적 안정성을 보장할 수 없게 된다. 기지를 중심으로

타원형태이었던 등수위선은 지하수 채수의 영향으로 남북으로 연결되어있는 산성암맥을 중심으로 지하수가 채수공을 향해 유동하여 장방형태를 형성하고 있다. 기지 인근에서 지하수를 채수할 경우 지하수계 영향범위(Fig. 16)는 공동을 중심으로 약 400m 이내이나, 입자추적법에 의한 범위는 지하수가 함양될 수 있는 공급원을 역추적한 입자의 유선 범위만을 나타내기 때문에, 북서쪽에서 남동쪽으로 한강을 배출원으로 유동하는 지하수계에서는 채수에 의한 영향을 표현할 수 없으므로 이에 더하여 채수로 인한 수위하강을 고려하여 채수공이 위치하는 약 900m까지 영향범위로 설정하였다.



Fig. 14. Equipotential contours, with activating W boreholes and deactivating OW boreholes.

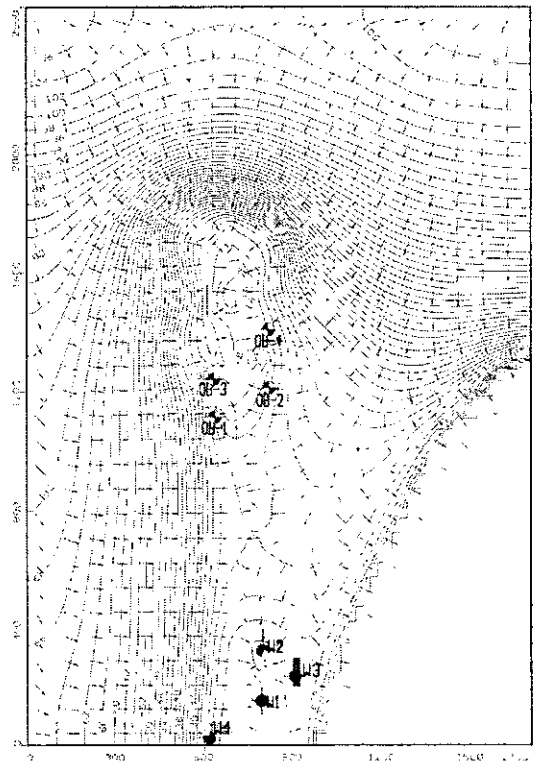


Fig. 15. Directions of groundwater flow, with activating W boreholes and deactivating OW boreholes.

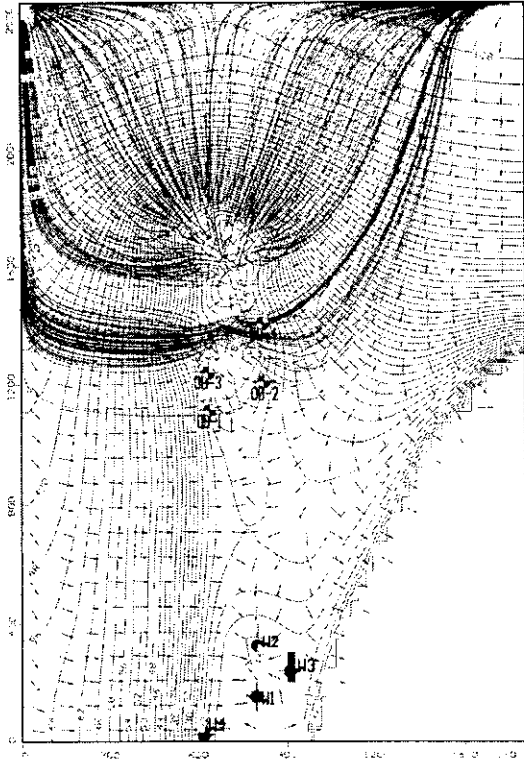


Fig. 16. Particle tracking, with activating W boreholes and deactivating OW boreholes.

수벽공을 설치한 경우

산성암맥의 주변부를 따라 지하수가 채수공으로 유동하고 관측공의 수위가 하강하는 수리간섭현상을 배제하기 위해 기지와 채수공과의 중간지점 EL.+79~84m 위치에 산성암맥을 관통하도록 수벽공 5공을 설치하였다. 이로인해 기지와 채수공 간의 지하수계가 완전하게 분리되어 두 수리지질 인자간에 새로운 경계가 형성되었고 어떠한 수리간섭현상도 발견되지 않음을 파악할 수 있었다(Fig. 17, 18). 기지 인근에서의 지하수 채수로 인한 수리간섭현상 배제를 위해 수벽공을 설치한 경우 지하수계 영향범위(Fig. 19)는 공동을 중심으로 약 450m 이내이다. 대부분의 지하수는 고지대와 수벽공로부터 공급되고 있으며, 지하수가 공동, 채수공, 그리고 한강을 향해 유동되는 지하수계를 형성하고 있다. 수위가 상승 회복하였고 지하수계가 분리되어 안전

한 석유류 저장을 위한 수리지질학적 안정성을 충족시키고 기지 주변의 지하수계를 유지시킬 수 있음을 모델링을 통해 확인할 수 있었다.



Fig. 17. Equipotential contours, with activating W and OW boreholes.

기존자료와 수치해석 결과 비교

기존에 검토된 ○○지역에서의 지하수 채수로 인한 수위하강관련 대책보고서에서 지하수계는 북서쪽에 위치하는 산 정상으로부터 남동쪽의 한강으로 유입되며, 지형적으로 연구지역 중심부에서 북동-남서 방향으로 존재하는 계곡에 의해 분기되는 양상을 나타낼 것으로 추정하고 있다. 현장검증시험 결과 OB-2호공에 추적자를 주입하여 채수공 W2 공이 지하수 유동의 영향권 내에 있음을 확인하였다(선경건설(주)부설연구소, 1997). 지하수 채수로 인한 수위하강에 대해 수리간섭영향을 배제하고

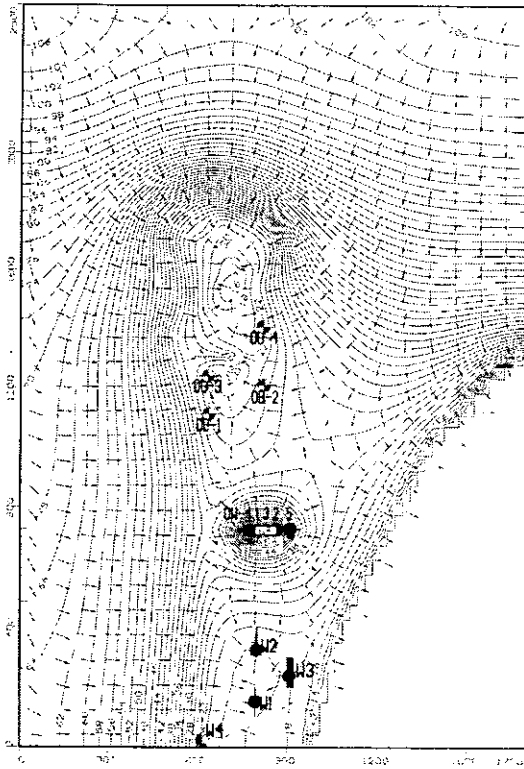


Fig. 18. Directions of groundwater flow, with activating W and OW boreholes.

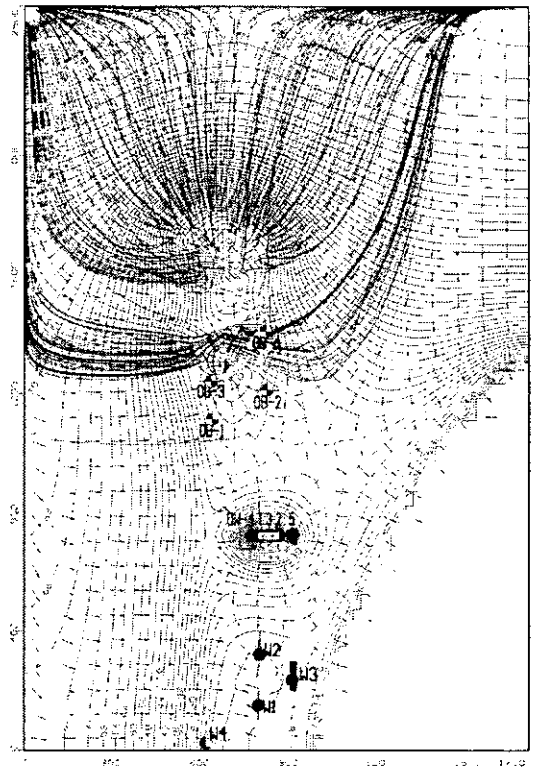


Fig. 19. Particle tracking, with activating W and OW boreholes.

자 채수공 주변에 수벽공 5공을 설치한 수벽시설 관련보고서에서 수벽공을 가동하여 기지 인근 관측공의 수위를 상승시켰다. 실제로도 10m 이상 하강하여 문제가 되었던 관측공 OB-2호공의 수위가 수벽공 가동으로 회복하여 수리간섭 차단효과를 충분히 확인하였다(지오텍컨설팅(주), 1998). 모델링을 수행하고 도출한 해석결과를 현재 자료와의 비교 검토함으로써 실제현상과 모델링 결과가 일치함을 확인하였고 모델링의 신뢰도를 향상시켜 주었다.

토 의

본 연구의 모델링에서는 수평적인 수리지질학적 영향에 중점을 두었기 때문에 개념모델에서 수직적인 이방성에 대해 고려하지 않고 전체를 등방성으로 가정하여 단면상 층별로 구분하지 않았으나 수직적인 지하수 유동계에 대한 해석을 위해서 특정

적인 층별로 그룹화시켜 분류할 필요가 있다. 연구 지역의 모델링 격자 설정에 있어 공동과 수벽공을 모델에 포함시키기 위해 과다하게 세격자로 설정하여 계산 수행에 있어 많은 시간이 소요되었으며, 이에 적절한 모델링 격자설정의 필요성을 확인할 수 있었다. 지하수계 영향범위 산정을 위한 방법으로 입자추적법을 이용한 모델링 결과, 외부로부터 수리지질학적 영향이 없는 모델과 지하수를 채수한 경우 모델의 영향범위가 서로 유사한 양상을 나타내는 취약점을 보였다. 이는 가상의 입자를 공동 주변에 설치하고 지하수의 근원을 역추적하여 입자의 유선으로 표현되는 범위를 영향범위로 산정하므로 기지 인근에서의 채수로 인한 직접적인 수위 및 수두의 하강은 표현할 수 없기 때문으로 사료된다.

결 론

본 논문에서는 수리동력학적인 수밀성을 필요조건으로 석유류를 지하에 저장하는 비축기지 인근에서 발생가능한 지하수계 교란과 수리지질학적 안정성 저해요인을 사전에 방지하고 기지를 안정하게 운영하기 위해 수치해석방법을 이용하여 인근 지하수계에 대해 연구하였다. 모델링을 수행 후 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 외부로부터의 수리지질학적 영향요인이 없는 경우 즉 기지 부근에서 지하수 채수가 없는 경우, 지하수계는 수리수문에 따라 고지대로부터 수리전도도가 상대적으로 높은 공동이나 지하수 배출지역인 한강으로 지하수가 유동하는 전형적인 양상을 보이나, 지하수를 채수한 경우 기지와 채수공 사이에 존재하면서 지하수 유동로 역할을 하는 것으로 추정되는 산성암맥을 통하여 채수공으로 지하수가 유동하고 수위가 하강하는 등 수리지질인자들 사이의 간섭현상이 발생함을 수치해석을 통해 확인할 수 있었다.

2. 기지의 수리지질학적 안정성을 확보하고 수리 간섭현상을 배제하기 위해 수벽공을 설치한 경우 수위가 상승 회복하였으며, 수벽공이 기지와 채수공 사이에 새로운 수리지질학적 경계의 역할을 수행함으로써 연구지역의 지하수계가 완전하게 분리되었고, 이에 어떠한 수리간섭 현상도 발견되지 않았다. 이와 같이 기지 주변의 지하수계를 유지시키기 위한 직접적인 방법인 수벽공의 효과를 모델링을 통해 확인하였다.

3. 수치해석방법의 하나인 입자추적법을 이용하여 기지 부근의 지하수계 영향범위를 파악하였다. 외부로부터 수리지질학적 영향이 없는 경우 산정된 영향범위는 공동을 중심으로 약 400m 이내이나, 기지 부근에서 지하수를 채수한 경우 입자추적법에 의한 유선의 범위와 지하수 채수로 인한 수위하강을 고려하여 채수공이 위치하는 약 900m까지 설정하였다. 수벽공을 설치했을 경우 요구되는 영향범위는 공동을 중심으로 약 450m 이내로 설정하였으

며, 이 지역 내에서의 지하수 채수나 지하 구조물 건설은 수위하강과 지하수계의 변형을 유발하여 공동의 수리지질학적 안정성을 저해시킬 것으로 추정된다.

사 사

항상 세심한 배려로 이끌어 주신 정지곤 교수님, 김천수 박사님, 김경수 박사님께 마음 속 깊이 감사드리며, 원고를 심사하여 주시고 보다 향상된 논문을 위해 지적을 해주신 익명의 심사위원님들께도 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 김경수, 2000, 수치모델링을 이용한 지하 원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 충남대학교 대학원 박사학위논문, 113~120.
- 이경주, 1996, 지하 유류비축기지 수벽공의 효율에 관한 현장계측 및 수치해석 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 이경주, 정현영, 1998, 용수채수가 지하 저장공동에 미치는 수리간섭영향연구, 한국석유개발공사 '98년 비축기지 건설기술세미나 논문집.
- 선경건설(주)부설연구소, 1997, 수리지질학적 영향평가 현장검증시험 결과보고서.
- 원종관 외 4명, 1981, 한국지질도 1:50000 독섬 도폭, 한국동력자원연구소.
- 지오텍건설탈트(주), 1998, 수벽공 시설 설치 및 온천 채수량 시험 종합보고서, 2~82.
- 한국석유개발공사, 1991, K-1추가비축기지 조사설계 용역 기본조사보고서.
- 한국석유개발공사, 1991, K-1추가비축기지 조사설계 용역 기본설계보고서.
- 한국석유개발공사, 1996, K-1추가비축기지 건설지, 17~60, 167~195.
- 한국석유공사, 1999, U-1추가기지 지하동굴 조사설계 용역 기본설계보고서, 407~471.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 735~797.
- 한정상, 한찬, 1999, 3차원 지하수 모델과 응용, 박영사.

정현영, 송무영, 이경주

B. Åberg, 1977, Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock, the first Int. Sympo. on Storage in Excavated Rock Caverns, Rockstore 77, Stockholm, Sweden, September 5~8.

Geostock, 1977, Summary of the Results of K1 Site Investigations Seoul - Korea Underground Oil Storage.

Geostock, 1993, Extension of The L-1 Storage Facility Hydrogeological Basic Design, 38~40.

정현영

한국석유공사 석유비축처 대리

431-711 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14

Tel : 031-380-2224, Fax : 031-386-3635

E-mail : jhy@knoc.co.kr

송무영

충남대학교 지질학과 교수

대전광역시 유성구 궁동 220

Tel : 042-821-6423, Fax : 042-823-3722

E-mail : mysong@cnu.ac.kr

이경주

한국석유공사 석유비축처 부장

431-711 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14

Tel : 031-380-2221, Fax : 031-386-3635

E-mail : kyungju@knoc.co.kr