

지하공동주변 수리전도도의 불균일성을 도입한 수두 및 동수경사의 불확실성 해석

Uncertainty Analysis for Head and Gradient Incorporating Spatial Nonuniformity of Hydraulic Conductivity around Underground Storage Caverns

정 일 문* / 조 원 철** / 허 준 행***

Chung, Il Moon / Cho, Woncheol / Heo, Jun Haeng

Abstract

For the proper design and management of underground storage cavern, groundwater flow around cavern should be analyzed. Since this flow is influenced by spatial nonuniformity of hydraulic conductivity, the two-dimensional finite element flow model incorporating stochastic concepts was developed to analyze influences due to this nonuniformity. Monte Carlo technique was applied to obtain an approximate solution for two-dimensional, steady flow in a stochastically defined nonuniform medium. For this purpose, the values of hydraulic conductivity were generated for each element with known mean and standard deviations. The uncertainty in model prediction depends on both the nonuniformity in hydraulic conductivity and the natures of the flow system such as water curtain and boundary condition. Therefore the uncertainties in predicted hydraulic head and gradient are the greatest where the mean hydraulic gradients are relatively large and far from the boundaries. Especially, we relate these uncertainties with well known gas tightness condition.

Keywords: hydraulic conductivity, spatial nonuniformity, underground storage cavern, uncertainty, water curtain

요 지

지하저장공동의 적절한 설계와 관리를 위해서는 공동주위의 지하수 흐름이 분석되어야 한다. 지하수 흐름은 수리전도도의 공간적인 변동성에 의해 영향을 받게 되므로 본 연구에서는 이러한 영향분석을 위해 추계학적 개념을 도입한 2차원 유한요소모형을 개발하였다. 추계학적으로 정의된 불균일 매질에서의 2차원 정류흐름에 대한 근사해를 얻기 위해 Monte Carlo 방법을 이용하였으며, 이를 위해 알려진 평균과 표준편차를 가진 수리전도도를 발생시켰다. 모형을 통한 예측결과와 불확실성은 수리전도도의 불균일성 뿐 아니라 수막시설이나 경계조건과 같은 흐름계의 성질에도 좌우되는 것으로 나타났다. 따라서 수두와 동수경사의 예측에 대한 불확실성은 평균동수경사가 상대적으로 큰 공동직상부에서 크고, 경계로부터 멀수록 커지는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 특히 동수경사의 불확실성을 널리 알려진 기밀조건식과 관계시켜 분석하였다.

핵심용어 : 수리전도도, 공간적 불균일성, 지하저장공동, 불확실성, 수막시설

* 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Engrg. Div., Korea Institute of Construction Technology, Kyonggi 411-410, Korea

** 연세대학교 사회환경시스템 공학부 교수

Prof. School of Civil and Urban Engrg., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

*** 연세대학교 사회환경시스템 공학부 부교수

Associate Prof., School of Civil and Urban Engrg., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

1. 서 론

우리나라는 대규모의 유류비축기지를 보유 또는 건설하고 있으며, 그 목적은 에너지원을 비상시에 이용할 수 있도록 저장함에 있다. 지하공동(cavern)에 유류를 저장하는 원리의 핵심은 공동상부에 일정한 정수압이 유지되어 공동내부의 가스압보다 큰 압력이 유지될 수 있도록 하는 것이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 필요한 경우 인공증압시설인 수막(water curtain)을 설치하여 유류의 휘발성 누출을 막고 있다. 현재까지 이러한 누출방지에 관해서 국내외에서 지속적인 연구(Åberg, 1977; 정형식과 이익호, 1983)가 이루어져 왔으며, 실험 또는 수치해석을 통한 결과를 토대로 여러 가지 기밀성(氣密性)조건도 제시되어 왔다(Komada, 1985; 정일문 등, 1998). 그런데 유류저장 공동주위의 흐름해석은 확정론적 모형의 수학적 해법에 많이 의존하여 왔으며(정일문 등, 1997; 한일영 등, 1996), 개개의 토양층 및 지질학적 형태를 균일(uniform)하고 균질(homogeneous)하다고 보고 해석하였다. 이는 계산 영역에 포함되는 지질학적 범위가 크고 심도가 깊어서 해당하는 자료획득이 어려울 뿐 아니라 이를 모형해석에 적절히 반영시키는 작업이 어려웠기 때문으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 기존의 확정론적 해석을 보완하기 위해 다공성매질에 내재하는 불균일성(nonuniformity)에 따른 불확실성 문제를 검토하고자 한다. 매질의 불균일성은 Greenkorn과 Kessler(1969)가 제안한 개념을 도입하였는데, 이 개념은 수리전도도 K 의 확률밀도함수 $f(K)$ 를 위치와 방향의 함수로 규정하여 그림 1과 같이 4가지 경우로 균일/불균일, 균질/비균질

의 개념을 설명하고 있다. 수리전도도의 확률밀도함수를 공간적으로는 불균일하고 통계학적으로 균질인 그림 1(c)의 경우로 가정하여 Freeze (1975)는 1차원 정상흐름에 대한 추계학적 개념의 모형을 제안하였다. 그는 격자를 균등하게 두고 해석적 방법으로 해를 구하였는데 대수변환된 수리전도도를 정규난수를 이용하여 발생시킨후 Monte Carlo 모의발생을 이용한 결과값을 통계학적으로 검토하였다. Smith와 Freeze(1979a)는 1차원 정상흐름의 추계학적 분석을 수행하여 거리의 함수로서의 자기상관계수를 도입하였고, 이어 균일한 블록의 공간으로 이산화한 2차원 문제로 확장하였다(Smith와 Freeze, 1979b).

본 연구에서는 지하공동해석을 위해 개발된 확정론적 수치모형(정일문 등, 1997)에 수리전도도의 불균일성에 따른 출력값의 변화양상을 추계학적으로 검토하기 위한 과정을 결합하였다. 수리전도도의 공간적 변화에 대한 실제수두값의 추계학적 변동성을 고려하기 위해 Monte Carlo 모의발생을 이용하였는데 이 방법은 추계학적 미분방정식을 푸는 것이 아니라, 통계학적으로 발생된 많은 수의 실현(實現, realization)에 대해 확정론적인 해를 구하는 것으로, 가능한 실현들의 평균과 분산을 통계학적으로 추정하는 것이다. 이 방법은 정확한 반면, 모의발생에 많은 시간이 걸리는 단점이 있으나 최근 컴퓨터의 급속한 발전으로 이러한 단점이 극복될 수 있다. 한편, 이 방법은 다음과 같은 제한사항을 포함한다. 첫째, 무작위 공간(random field)의 실현을 발생시키는 것은 근본적으로(inherently) 근사적이다. 둘째, 변동적인 계수들을 가진 흐름방정식의 수치해 또한 근본적으로 근사적이며, 특히 변동(예를

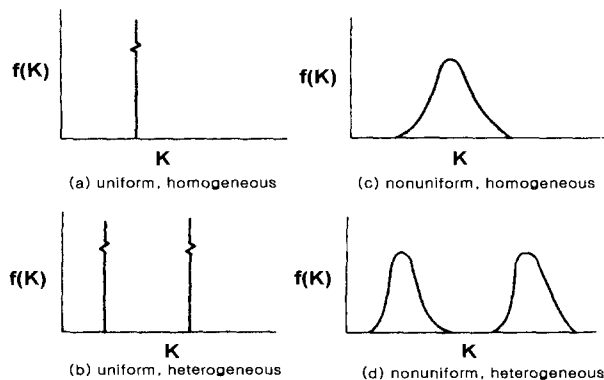


그림 1. 수리전도도의 균일/불균일, 균질/비균질성 (Greenkorn과 Kessler, 1969)

들면, 수리전도도)이 큰 경우는 근사화된 모형의 요소나 격점사이에서 수리전도도가 큰 변화를 일으킨다. 세 번째, 평균과 분산이 유한한 크기의 표본으로 부터 추정되어야 하는 기본적인 통계학적 제한성이다(Gelhar, 1993).

2. 수리전도도의 확률분포형 결정 및 검토

수리전도도에 대한 확률분포형의 선정에 관해서는 수 많은 연구가 수행되었으며, 대표적으로 몇 가지를 소개하면 표 1과 같다(Freeze, 1975). Law(1944)는 유티저장소 주변암반의 코아샘플자료를 분석하여 처음으로 대수정규분포라는 점을 제시하였으며, Bulnes (1946)와 Warren과 Price(1961), Brust 등(1968), Willardson과 Hurst(1965), McMillan (1966) 등은 토양표본시료 혹은 수리지질도를 분석하여 수리전도도가 대수정규분포라는 결론을 얻었다. 특히, Bennion과 Griffiths(1966)는 2,000개의 사질토 및 역암 우물에 대한 60,000개의 코아자료 및 석회암지대의 430개의 우물에 대한 24,000개의 코아자료에 대해 수리전도도가 대수정규형태의 분포를 가짐을 확인하였다. Massmann과 Hagley(1995)는 주로 사질재료에 대하여 최근까지의 자료를 이용하여 수리전도도의 대수정규

분포된 표준편차값들을 정리하였다.

본 연구에서는 실제 현장의 기본조사에 따른 시추공으로부터 자료를 취득하여 수리전도도의 공간적 분포에 대한 확률분포형을 결정하고자 하였으며, 대상 표본자료에 대해 수문자료의 해석에 많이 이용되고 있는 7가지 확률분포형(γ -2, γ -3, GEV, Gumbel, lognormal-2, lognormal-3, log-Pearson type III)을 가정하였다(표 2). 표 2에서 γ 분포와 lognormal 분포형의 경우 위치모수가 0이면 2모수, 그렇지 않은 경우는 3모수가 된다. 또한 표 3에서는 각 확률분포형에 대한 확률변수와 모수의 적절한 범위를 나타내었다.

각 확률분포형의 모수를 추정하기 위해 확률가중 모멘트법(probability weighted moments; PWM)을 이용하였다. 확률가중 모멘트의 일반식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Greenwood 등, 1979 ; Hosking, 1986).

$$M_{p,r,s} = E[X^p F^r(x) \{1 - F(x)\}^s] \quad (1)$$

여기서 p, r, s 는 정수이고 $F(x)$ 는 누가분포함수, $E[]$ 는 기대값을 의미한다. 일반적으로 사용하는 모집단의 확률가중 모멘트는 식 (2)와 (3)으로 나타나며, 각각에

표 1. 수리전도도의 대수정규분포에 대한 통계학적 모수(Freeze, 1975)

($Y = \log K$, K 의 단위는 cm/s)

출 처	암석이나 토양형	샘플수	$\hat{\mu}_y$	$\hat{\sigma}_y$
Bennion과 Griffiths (1966)	역암	3,018	-4.59	0.94
	사암	56,991	-5.38	0.61
	이회질 석회암	7,060	-5.38	0.46
	Vuggy 석회암	17,162	-5.60	0.53
Law (1944)	사암		-3.36	0.20
	사암		-3.82	0.40
	사암		-4.60	0.40
McMillan (1966)	사암		-5.46	1.00
	사암		-5.52	0.65
	사암		-4.60	0.32
	모래와 자갈		-	0.44
	모래와 자갈	42	-	0.72
Willardson과 Hurst (1965)	모래와 자갈	16	-	0.54
	점토질 로움	33	-5.41	0.45
		330	-4.00	0.85
		287	-4.60	0.93
	실트질 점토	339	-4.96	0.78
		36	-4.46	1.56
		352	-3.00	0.93
121		-2.68	0.86	
로움질 모래				

표 2. 적용 확률분포형

확률분포형	확률밀도함수(PDF) 또는 누적분포함수(CDF)
gamma	$f(x) = \frac{1}{ a \Gamma(\beta)} \left[\frac{x-x_0}{a} \right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{x-x_0}{a}\right]$
GEV	$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{a}\right)^{(1/\beta)}\right]$
Gumbel	$F(x) = \exp\left\{\exp\left[-\frac{(x-x_0)}{a}\right]\right\}$
lognormal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(x-x_0)\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2\right]$
log-Pearson type III	$f(x) = \frac{1}{ a \Gamma(\beta)x} \left[\frac{\ln(x)-y_0}{a} \right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{\ln(x)-y_0}{a}\right]$

주) $\Gamma(\beta) = \int_0^\infty z^{\beta-1} e^{-z} dz$: gamma 함수, a =규모모수, β =형상모수, x_0, y_0 = 위치모수

표 3. 확률변수 및 모수의 적정 범위

확률분포형	확률변수 및 모수의 적정 범위
gamma-2, 3	$\alpha < 0$ 일 때 $-\infty < x \leq x_0$ $\alpha > 0$ 일 때 $x_0 \leq x < \infty, \beta > 0$
GEV	$\beta = 0$ 일 때 GEV-1 : $-\infty < x < \infty$ $\beta < 0$ 일 때 GEV-2 : $x_0 + \alpha/\beta \leq x < \infty$ $\beta > 0$ 일 때 GEV-3 : $-\infty < x \leq x_0 + \alpha/\beta$
Gumbel	$-\infty < x < \infty$
lognormal-2, 3	$x_0 < x < \infty$
log-Pearson type III	$\alpha > 0$ 일 때 $\exp(y_0) \leq x < \infty$ $\alpha < 0$ 일 때 $0 < x \leq \exp(y_0)$

대한 표본자료의 불편 확률가중 모멘트는 식 (4), (5)와 같이 표시할 수 있다.

$$M_{1,r,0} = E[X^r F^r(x)] \equiv B_r \quad (2)$$

$$M_{1,0,s} = E[X^s \{1-F(x)\}^s] \equiv B'_s \quad (3)$$

$$\hat{B}_r = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(N-1)(N-2)\dots(N-r)}, \quad r > 0 \quad (4)$$

$$\hat{B}'_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \frac{(N-j)!(N-s-1)!}{(N-j-s)!(N-1)!}, \quad s \geq 0 \quad (5)$$

여기서 N 은 자료수, x_j 는 순서통계량으로 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$, $r=s=0$ 이면 $\hat{B}_0 = \hat{B}'_0 = \bar{X}$ 이고, \bar{X} 는 표본자료의 평균을 나타낸다.

본 연구의 적용대상지역에 분포하는 주 암석은 화강암질 편마암 및 흑운모 호상 편마암으로 저장공동심의 기반암은 국부적인 소규모 파쇄대를 제외하면 치밀 견고한 암반이 분포한다. 모형화 영역내의 현장수리전도도에 대한 확률분포형을 구하기 위해 투수시험자료 중 본 연구의 계산영역인 프로판공동에 인접한 A-10공과 A-12공의 자료를 이용하였으며, 각각에 대한 심도별 수리전도도 자료는 다음 표 4와 같다.

먼저 현장의 시추자료를 이용하여 7가지 확률분포형에 대해 확률모수(確率母數)를 추정하였으며, 추정된

표 4. 공동주변의 수리전도도에 대한 실측값 (한국석유개발공사, 1985)

공 변	지표하 측정구간 (m)	수리전도도 (K) ($\times 10^{-7}$ m/sec)	공 변	지표하 측정구간 (m)	수리전도도 (K) ($\times 10^{-7}$ m/sec)
A-10	51-54	2.595	A-12	55-58	1.830
	54-57	2.664		59-62	0.498
	57-60	3.139		63-66	1.036
	62-65	2.020		67-70	1.235
	67-70	2.651		71-74	1.356
	72-75	2.273		75-78	1.333
	78-81	1.894		81-84	1.201
	83-86	2.273		84-87	1.263
	86-89	1.894		88-91	1.544
	91-94	2.146		91-94	2.092
	96-99	2.273		95-98	1.449
	99-102	2.020		98-101	2.183
	104-107	1.998		103-106	1.731
	107-110	2.188		107-110	0.429
	110-113	2.399		115-118	1.115
	113-116	2.399		120-123	1.709
	116-119	1.832		126-129	0.857
120-123	1.768	132-135	0.943		
123-136	1.427	136-139	0.772		
128-131	1.768	139-142	1.544		
135-138	1.768	142-145	1.614		
143-146	2.378	145-148	1.499		
		152-155	0.838		

표 5. 추정된 모수와 확률변수 범위의 적절성 검토

확률분포형	위치모수	규모모수	형상모수	판 정
gamma-2	0.000	0.429	0.227	O.K.
gamma-3	-67.851	0.005	46.540	O.K.
GEV	1.535	0.635	0.355	O.K.
Gumbel	1.441	0.502	-	O.K.
lognormal-2	0.000	0.562	0.350	O.K.
lognormal-3	-5.952	2.042	0.080	N.G.
log-Pearson type III	1.089	-0.306	2.000	N.G.

모수와 확률변수가 표 3에 나타난 범위를 만족하는지의 여부를 표 5에 나타내었다. lognormal-3 분포와 log-Pearson type III 분포를 제외하고는 각 확률분포형에 대한 모수 및 확률변수의 범위는 적절한 것으로 평가되었다. 다음으로 추정된 모수에 대한 적합도 검정 (Goodness of fit test)을 세 가지 방법(χ^2 검정, Kolmogorov-Smirnov 검정, Cramer von Mises 검정)을 이용하여 수행하였으며, 이에 대한 결과는 다음

표 6에 나타내었다.

각 확률분포형에 대한 모수추정의 적합성 및 적합도 검정을 모두 만족하는 분포형은 gamma-2, GEV, Gumbel, lognormal-2 분포로 나타났다. 기존의 연구 결과에서 나타난 수리전도도의 2모수 대수정규분포라는 가정이 본 연구의 현장자료에도 만족하는 것으로 나타나, 이를 공간적 불균일성에 대한 적정 분포형으로 선정하였다.

3. 추계학적 변동성의 고찰

매질의 불균일 정도(degree of nonuniformity)는 현장수리전도도의 통계학적 분석을 통한 평균과 분산값을 고려하므로써 반영하였고, 각각의 계산을 1,000번씩 수행하는 Monte Carlo 모의발생을 수행, 1,000번의 계산결과에 대한 결과값의 변동성을 산정하도록 하였다. 이에 대한 계산흐름도는 다음 그림 2와 같다. 먼저, 수리전도도의 평균값에 알려진 표준편차를 입력한 후, 표준정규난수를 발생시킨다. 표준정규난수를 대수정규분포로 전환하여 대수화된 수리전도도를 발생시킨 후, 공간이산화된 개개의 유한요소의 요소특성값으로 입력

표 6. 적합도 검정결과

확률분포형	검정방법	검정통계치	표 값	판정
gamma-2	χ^2 검정	0.89	7.81	O.K.
	K-S 검정	0.09	0.18	O.K.
	CVM검정	0.09	0.46	O.K.
gamma-3	χ^2 검정	74.08	5.99	N.G.
	K-S 검정	0.58	0.18	N.G.
	CVM검정	2.09	0.46	N.G.
GEV	χ^2 검정	1.27	5.99	O.K.
	K-S 검정	0.06	0.18	O.K.
	CVM검정	0.01	0.46	O.K.
Gumbel	χ^2 검정	3.93	7.81	O.K.
	K-S 검정	0.11	0.18	O.K.
	CVM검정	0.15	0.46	O.K.
lognormal-2	χ^2 검정	5.27	7.81	O.K.
	K-S 검정	0.10	0.18	O.K.
	CVM검정	0.09	0.46	O.K.

한다. 다음으로 유한요소모형을 실행하여 결과로서 얻어지는 수두값의 분포를 구한다. 실제적인 변동성을 모의하기 위해 이같은 계산을 1,000번 수행하며, 1,000번의 계산에 대한 수두값의 평균과 표준편차를 산정하여, 수리전도도의 공간적 변동에 따른 수두값의 변동성을 예측한다.

본 연구에서의 시추자료 분석 결과 화강편마암의 특성을 보이는 시추공 A-10과 A-12의 자료를 합친 45개의 표본에 대해 표 1에서의 단위로 계산한 대수화된 평균은 -4.79(cm/sec), 표준편차는 0.19를 나타내어 표 1에서 나타난 공간적 변동값(0.2~1.56)에 비해서는 작게 나타났다. 표 1에 나타난 표준편차는 토양별로 나타난 변동값으로서 일반적인 참조값이 될 수 있다고 판단되어, 본 연구에서는 대수화된 평균 -4.79 cm/sec에 대해 표준편차를 실제보다 크게 가정하여 0.5, 1.0, 1.5의 세 가지 경우에 대한 해석을 계획하였다. 이렇게 불균일도를 크게 한 것은 불균일도가 커짐에 따라 수리전도도의 공간적 변동이 수두값의 변동에 미치는 영향을 검토하기 위한 것으로 세부적인 과정은 다음과 같다.

수리전도도 K 가 대수정규분포를 한다면 대수화시킨 수리전도도 Y 는 정규분포를 보이게 된다.

$$Y = \log_{10}K \quad (6)$$

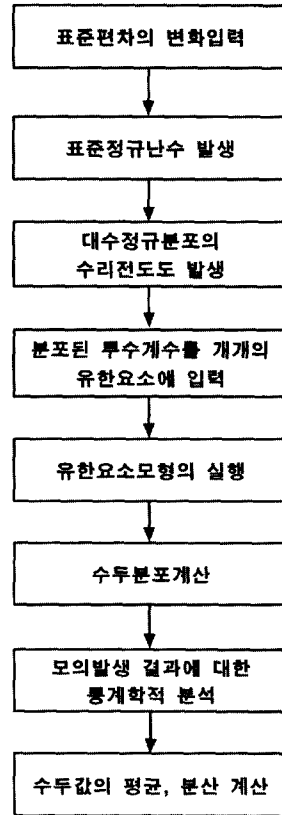


그림 2. Monte Carlo 모의발생의 계산흐름도

$$Y = \mu_y + RN\sigma_y \quad (7)$$

여기서 RN은 표준정규난수로 $N[0,1]$ 의 분포형을 따르고, μ_y 는 -4.79 (cm/sec), σ_y 는 0.5, 1.0, 1.5이다.

대수수리전도도로부터 수리전도도 K 의 분포를 얻을 수 있다.

$$K = \exp(2.3026Y) \quad (8)$$

4. 결과분석

본 연구의 계산영역에 대한 내용은 이미 자세하게 소개된 바 있으므로(정일문 등, 1997) 여기서는 이해를 돕기위해 기존해석의 결과를 토대로 간단하게 설명하고자 한다. 계산영역은 공동의 단면과 수막의 단면을 포함한 연직 2차원 영역(206 m×84.5 m)이며, 마제형 공동의 폭은 18 m, 높이는 22.5 m이며, 수막의 단면

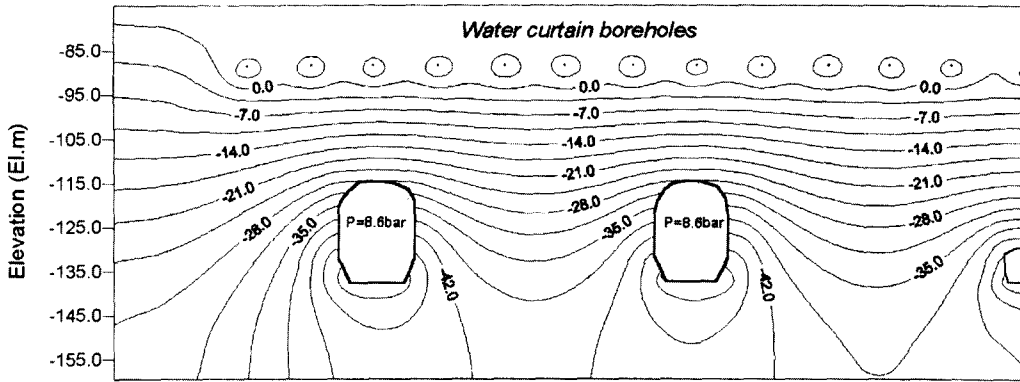


그림 3. 확정론적 해석에 의한 수두분포

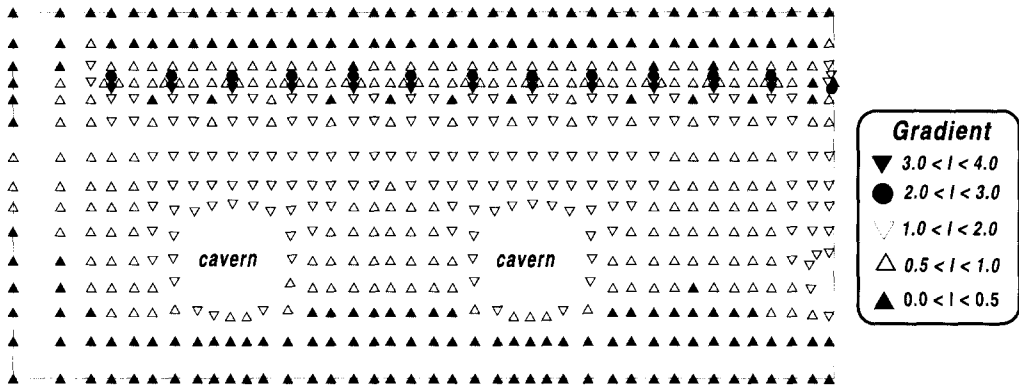


그림 4. 확정론적 해석에 의한 동수경사의 분포

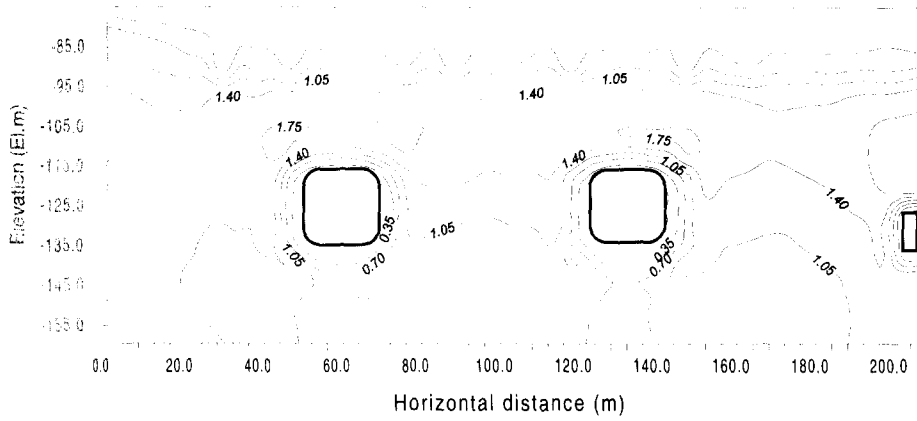
은 직경 10 cm의 원형이고, 간격은 25 m이다(한국석유개발공사, 1991). 본 연구에서 수집된 자료에 의하면 대수화된 평균수리전도도는 -4.79 cm/sec 로 이를 환산하면, 약 $1.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 가 되며, 확정론적 해석에서 수리전도도의 대표값으로 660개의 유한요소망에 입력된다. 이러한 정상상태의 해석을 수행하여 수두분포를 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 유류의 휘발을 막기 위한 수막시설은 EL. -90.0 m 에 위치하며, EL. 5.0 m 의 수두가 일정하게 유지된다. 매질이 포화되었다고 가정하면, 프로판가스 공동상부(EL. -115 m)에서의 전수두는 수막에 의해서 120 m 의 수두가 확보되며, 이중 상향 가스압 환산수두인 86 m 를 빼주게 되면, 34 m 의 안전수두가 구해진다. 이러한 수막시설에 의해서 공동상부의 동수경사가 크게 유지되며, 이때의 가스기밀성 조건은 Åberg(1977)의 제안식에 따르면, 공동상부의 동수경사 (I_0)가 1보다 크면 유지되므로,

그림 4에서의 같이 공동상부의 동수경사분포가 $1 < I_0 < 2$ 를 나타내어 현 상태에서 기밀조건은 만족되는 것으로 평가된다.

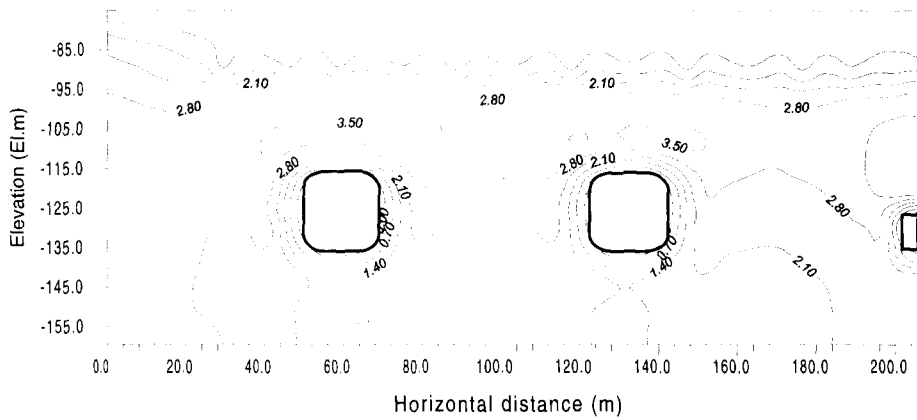
본 연구에서는 이와같은 확정론적 해석에 수리전도도의 불균일성을 도입시킨 추계학적 해석을 통해 수두와 동수경사의 불확실성을 평가하였다.

4.1 수두의 불확실성

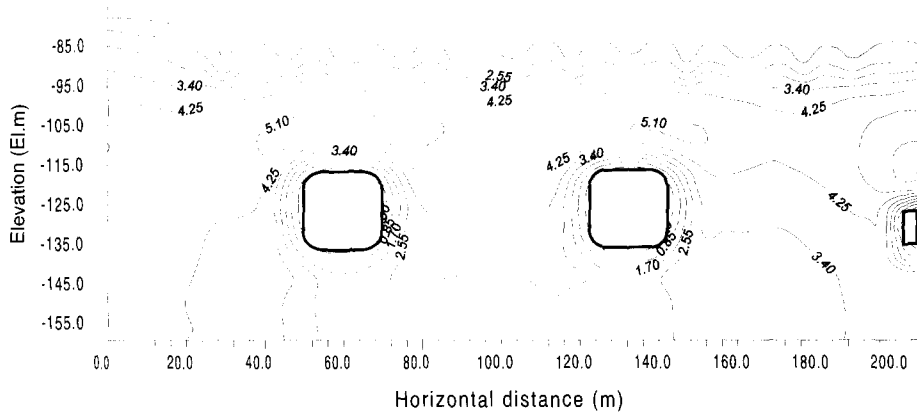
식(8)의 수리전도도를 계산영역내에서 유한요소의 개수 만큼 발생시켜 개개의 요소에 입력하였다. 이에 대한 결과로서 얻어지는 수두분포를 구하였으며, 이러한 수두분포의 실제적 변동성을 얻기 위해 1,000번의 Monte Carlo 모의발생을 수행하였다. 1,000번의 모의 발생 결과로부터 수두분포의 평균과 표준편차값을 구할 수 있었으며, 수리전도도의 불균일성이 수두분포의 변화에 미치는 영향을 평가할 수 있었다.



(a) K의 $\sigma = 0.5$

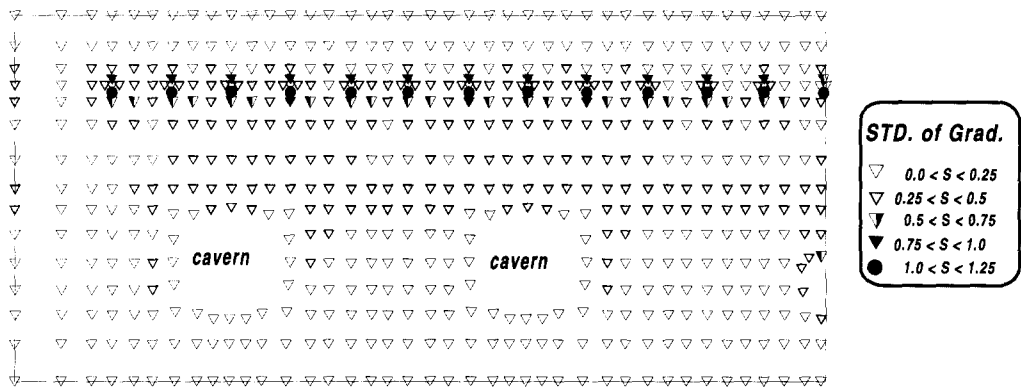


(b) K의 $\sigma = 1.0$

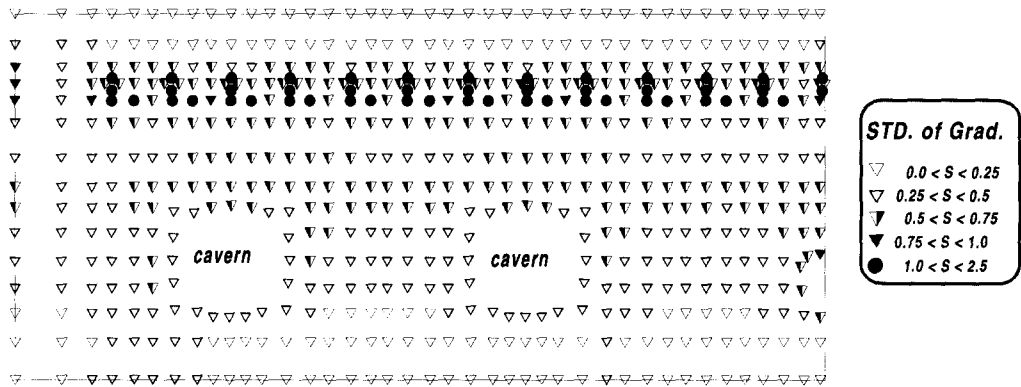


(c) K의 $\sigma = 1.5$

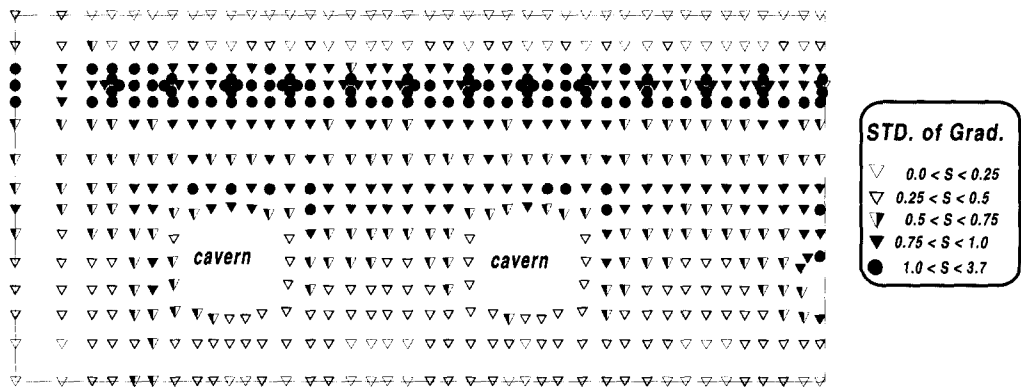
그림 5. 수두값에 대한 표준편차의 분포



(a) K의 $\sigma = 0.5$



(b) K의 $\sigma = 1.0$



(c) K의 $\sigma = 1.5$

그림 6. 수리전도도의 공간적 변동에 의한 동수경사의 표준편차

먼저 각 격점에서의 수두에 대한 표준편차의 분포를 그림 5에 나타내었다. 일정수두경계는 수막과 공동의 경계부가 되며, 그림에서 굵은 선으로 나타난 부분이 공동의 경계이고 수막의 위치는 EI. -90.0 m이다. 그림 5(a)는 수리전도도의 대수화된 평균이 -4.79 cm/sec일 때, 표준편차가 0.5인 경우에 해당하는 수두값의 표준편차 분포를 나타낸 것이다. 그림 5와 같이 수막설치로 인해 수막으로부터 공동으로 유입되는 흐름이 가장 활발한 공동상부에서 수두의 표준편차는 1.75로 나타나 흐름이 급한 부분에서 가장 큰 값이 나타남을 알 수 있었다. 또한, 확정값이라고 할 수 있는 공동의 경계에 가까울수록 수두값의 불확실성은 작아지며 경계로부터 멀수록 불확실성이 커짐을 알 수 있었다. 그림 5(b)는 수리전도도의 표준편차가 1.0인 경우로 공동상부에서의 수두값의 표준편차는 3.50으로 커지며, 그림 5(c)는 수리전도도의 표준편차가 1.5인 경우로 공동상부의 수두값의 표준편차는 5.10으로 세 경우 중 가장 큰 값을 나타내어 수리전도도의 공간적 변동성이 커짐에 따라 결과값인 수두의 표준편차도 크게 나타나는 양상을 확인할 수 있었다. 이와같이 수두값의 공간적인 변동성은 수리전도도의 불균일성과 경계조건에 좌우되며, 평균동수경사(mean hydraulic gradients)가 큰 공동상부에서 크고 경계부근에서는 0에 가까운 것으로 나타났다.

4.2 동수경사의 불확실성

4.1절에서 나타난 바와 같이 수두의 불확실성은 흐름이 급한 공동직상부에서 크게 나타났다. 따라서, 이에 상응하는 동수경사의 분포도 같은 결과가 예상된다. 그림 6(a)는 수리전도도의 표준편차가 0.5인 경우의 동수경사의 표준편차분포를 나타내며 평균동수경사가 크게 나타난 공동의 직상부와 수막시설 인접부근에서 마찬가지로 크게 나타났으며, 공동직상부에서의 표준편차인 S의 범위는 대체로 0.25~0.5의 범위를 나타내었고, 수막공 인접지역에서는 0.75~1.25의 범위를 나타내었다. 그림 6(b)에서도 동일한 양상을 나타내며, 수리전도도의 표준편차가 1.0으로 커짐에 따라 동수경사의 공간적 변동도 커져서 공동직상부에서 대체로 0.5~0.75의 범위를 나타내었으며, 수막공 인접지역에서는 0.75~2.5의 범위를 나타내었다. 그림 6(c)는 수리전도도의 표준편차가 1.5인 경우로 공간적 불균일성이 가장 큰 경우에 해당하며, 공동직상부에서의 표준편차의 S의 범위는 0.75~1.0의 범위를 나타내었으며 1.0보다 큰

경우도 나타났다. 또한 수막공 인접지역에서 0.75~3.7의 범위를 나타내었다.

4.3 동수경사의 불확실성과 기밀조건과의 관계

수리전도도의 불균일성에 의해 공동상부의 수두 및 동수경사에 변동이 생기며, 특히 동수경사의 변동폭에 대한 의미를 기밀조건과 결부시켜 이해해 볼 수 있었다. 기존의 기밀조건중 가장 대표적인 Åberg(1977)의 제안식에서는 공동상부의 동수경사가 1보다 크게 되면 기밀성이 유지되는 것으로 보고 있다. 그런데 본 연구에서 도입한 추계학적 해석의 결과를 보게 되면, 수리전도도의 공간적 변동성(σ)이 커짐에 따라 동수경사의 변동(S)도 커지는 것을 확인하였다. 즉, 동수경사라는 항목을 불변하는 고정값으로 볼 수 없으므로, 지하유류 저장공동의 가스기밀성은 수리전도도의 불균일성과 보다 구체적으로 연결되어야 하며 기존의 기밀조건식에 수리전도도의 변동성을 고려한 동수경사의 안전개념이 설정될 수 있을 것이다. 본 연구의 예를 들자면, 수리전도도의 변동성(σ)이 최대 0.5라면 공동상부의 동수경사에 대한 표준편차 S는 그다지 큰 변화를 보이지 않으나 변동성이 더욱 커져서 최대 1.5까지 커지는 경우라면, 공동상부의 동수경사에 대한 S는 1보다 큰 경우가 발생되며, 이 경우 기존의 기밀조건식은 더 이상 만족하지 못한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 매질의 불균일성이 흐름 및 기밀조건에 미치는 영향을 분석하기 위해 실제 자료에 대한 확률분포형의 선정 및 추계학적 개념을 도입한 2차원 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실제 적용대상지역의 수리전도도 자료에 대해 7가지 확률분포형을 가정한 모수추정결과 기존의 연구결과와 같이 2모수 대수정규분포를 만족하여 이를 적정 분포형으로 선정하였다.

(2) 실제 결과값의 변동을 모의하기 위해 Monte Carlo기법을 이용하여 확정론적 유한요소흐름모형에 추계학적 개념을 도입한 모형을 확립하였다.

(3) 수리전도도의 표준편차가 클수록 수두값의 표준편차는 커지며, 동수경사가 큰 지역인 공동의 직상부와 수막 주변, 그리고 경계조건에서 먼 지역에서 크게 나타났다.

(4) 수막시설 설치에도 불구하고 수리전도도의 불균

일성이 매우 큰 매질의 경우는 공동상부에서의 동수경사가 큰 변동을 보이게 됨에 따라 기밀조건에는 매질의 변동성도 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 정일문, 조원철, 배덕효 (1997). "지하저장공동의 지하수 흐름(수막)해석을 위한 수치모형의 확립." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제1호, pp. 63-73.
- 정일문, 조원철, 허준행 (1998). "지하저유공동의 기밀성(氣密性)을 위한 수막시설의 수리학적 분석." 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-2호, pp. 131-139.
- 정형식, 이익효 (1983). "지하원유비축공동에서 water curtain의 효율성에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp. 87-94.
- 한국석유개발공사 (1985). A사업조사설계용역 기본설계보고서.
- 한국석유개발공사 (1991). A비축기지 기본설계보고서.
- 한일영, 서일원, 오경택 (1996). "수치모의를 통한 지하 LPG 저장시설에 인접한 폐기물 매립지에서의 침출수 이동 및 제어공법 검토." 지하수 환경, 제3권, 제2호, pp. 51-59.
- Åberg, B.(1977). "Prevention of gas leakage from unlined reservoir in rock." *Rockstore*77. pp. 399-413.
- Bennion, D.W. and Griffiths, J.C. (1966). "A stochastic model for predicting variations in reservoir rock properties." *Trans. AIME*, 237, part2, pp.9-16.
- Bianchi, L. and Snow, D. (1968). "Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fracture." *Ann, Arid Zone*, Vol. 8. No. 2, pp. 231-245.
- Bulnes, A.C. (1946). "An application of statistical methods to core analysis data of dolomitic limestone." *Trans. AIME*, Vol. 165, pp. 223-240.
- Brust, K.J., van Bavel, C.H.M., and Stirk, G.B. (1968). "Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots." *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 32, pp. 322-326.
- Freeze, R.A. (1975). "A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 5, pp. 725-741.
- Gelhar, L.W. (1993). *Stochastic subsurface hydrology*, Prentice Hall.
- Greenkorn, R.A. and Kessler, D.P. (1969). "Dispersion in heterogeneous nonuniform anisotropic porous media." *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 61, No. 9, pp. 14-32.
- Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N.C., and Wallis, J.R. (1979). "Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1049-1054.
- Hosking, J.R.M. (1986). *The theory of probability weighted moments*. Research Report RC12210, IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York.
- Komada, H. (1985). "Study on leaked air from compressed air storage in rock mass." *17th symposium on rock mechanics*, Japan.
- Law, J. (1944). "A statistical approach to the interstitial heterogeneity of sand reservoirs." *Trans. AIME*, Vol. 155, pp. 202-222.
- Massmann, J.W. and Hagley, M.T. (1995). "A comparison of model and parameter uncertainties in groundwater flow and solute transport predictions." *Groundwater Models for Resources Analysis and Management*, Edited by El-Kadi, A., Lewis Publishers.
- McMillan, W.D. (1966). *Theoretical analysis of groundwater basin operations*. Water Resour. Center Contrib. Vol. 114, Univ. of Calif., Berkeley.
- Smith, L. and Freeze, R.A. (1979a). "Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain, 1. One dimensional simulation." *Water Resources Research*, Vol.

15, No. 3, pp. 521-528.

Smith, L. and Freeze, R.A. (1979b). "Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain, 2. Two dimensional simulations." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1543-1559.

Warren, J.E. and Price, H.S. (1961). "Flow in heterogeneous porous media." *Soc. Petrol.*

Eng. J., Vol. 1, pp. 153-169.

Willardson, L.S. and Hurst, R.L. (1965). "Sample size estimates in permeability measurements." *J. of Irrigation and Drainage Div., ASCE* Vol. 91, No. IR1, pp. 1-9.

(논문번호:98-023/접수:1998.04.20/심사완료:1998.08.22)