2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

확률론적 지하수유동 해석을 위한 데이터 생성 프로그램 개발과 활용

Development and Application of the Data Generating Program for Probabilistic Groundwater Flow Analysis

박주완, 김현주, 이은용, 김창락
한국수력원자력㈜ 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호

장근무
산업자원부 자원정책과
경기 과천시 중앙동 1 정부과천청사 내

요 약

확률론적 지하수 유동해석을 수행하기 위하여 기존의 결정론적 해석코드로 사용된 NAMMU 코드에 확률론적 해석 기능을 부여하여 확률밀도함수와 베리오그램에 따른 몬테카를로 방식에 대한 투수계수를 연속체에 분포시키는 기법을 제시하였다. 이러한 과정에서 소요될 수 있는 시간과 노력을 최소화하기 위하여 NAMMU용 데이터 파일을 자동적으로 생성할 수 있는 NAMDATA 프로그램을 개발하였다. 가상의 처분부지를 설정하고 상기한 방법에 근거하여 불균질 매체에서의 투수계수의 분포를 정의하기 위한 확률론적 지하수 유동 해석을 실시하여 처분장의 안전성 평가 입력자료로 적용될 수 있음을 입증하였다.

Abstract

To perform the probabilistic groundwater flow analysis, it was suggested to distribute transmissivity coefficient into continuum model by using Monte-Carlo method for the probability density function and variogram to take probabilistic analysis function into NAMMU that has used as a deterministic analysis code. In these processes NAMDATA program that can automatically generate data file for NAMMU was developed to minimize the required time and effort. Probabilistic groundwater flow analysis was performed to define the distribution to transmissivity coefficient in heterogeneous media based on above method for the hypothetical disposal site, and demonstrated that NAMDATA was available to generate input data for probabilistic safety assessment of a disposal repository.

1. 서 론

방사성폐기물 처분장의 확률론적 안전성 평가를 위해서는 주요 입력변수를 확률밀도함수로 나타내어야 한다. 이러한 입력변수 중에서 지하수 유동로나 속도는 지하수를 통한 핵종이동에 큰 영향을 미치므로 이들 변수에 대한 확률밀도함수를 정량적으로 설정하는 것이 매우 중요하다.

단일한 투수계수를 입력값으로 하는 결정론적 해석에서는 지하수 유동로나 속도에 대한 단일 결과값만을 제공하므로 확률밀도함수를 제시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 확률론적 지하수 유동해석을 수행하기 위하여 기존의 결정론적 해석코드로 사용된 NAMMU 코드에 확률론적 해석 기능을 부여하기 위한 방법론을 제시하였다.

불균질 매체에서의 투수계수의 분포를 정의하기 위한 확률밀도 함수와 베리오그램 함수들에 근거하여 몬테카를로 방법에 따라 투수계수를 연속체에 분포시키는 추계적 연속체 모델링 기법이 제시되었으며, 이 과정에서 소요될 수 있는 시간과 노력을 최소화하기 위하여 사용자가 지정하는 수의 NAMMU용 데이터 파일이 자동적으로 생성될 수 있는 프로그램을 개발하였다. NAMDATA는 Visual Basic 언어로 작성되었으며 생성된 다수의 NAMMU용 데이터 파일을 배치(Batch) 기능을 이용하여 NAMMU에서 수행되도록 하였다.

또한, 추계적 연속체 모델링과 NAMDATA 프로그램의 적용성 분석을 위해 2차원 가상 처분부지에 대한 확률론적 지하수 유동 해석을 실시하여 얻어진 입력 변수들에 대한 확률밀도분포함수가 처분장 안전성평가의 입력자료로 적용될 수 있음을 입증하였다. 향후 이 프로그램은 국내 처분장에 대한 확률론적 안전성평가를 수행하는데 이용될 것이다.

2. 확률론적 지하수유동 해석을 위한 데이터 생성 프로그램 개발

2.1 추계적 지하수 유동평가 방법론

단열망(Discrete Fracture Network: DFN) 해석모델은 암반에서의 흐름을 사실적으로 모델링할 수 있으며 동일한 통계적 특성을 가지는 모델을 구현할 수 있으므로 결정론적인 입력치를 대상으로 하는 연속체 해석모델에 비해서 통계적인 결과치를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 단열망 해석모델은 컴퓨터 계산용량의 한계로 인한 균열 수의 제한이 따르게 된다. 그러므로 수 십 미터 규모에서 구성된 단열망 모델을 광역의 규모로 영역확대 해석(Up-scaling)하기에는 어려운 점이 있으며, 이를 위하여 단열망 모델로부터 추계적 연속체(Stochastic Continuum: SC) 해석모델을 구성하는 새로운 기법을 제시하였다[1-3]. 이 방법은 그림 1 에 나타낸 바와 같이 영역확대 해석을 위하여 현장조사로부터 구성된 소규모 불록에 대한 3 차원 단열망 모델을 광역규모의 불균질 매체에서의 투수계수의 분포함수와 베리오그램 (Variogram)을 구하여 투수계수의 공간적 분포 특성을 정의하고, 이 함수들로부터 연속체(예를 들면, 해석 전산코드인 NAMMU 의 개별 유한요소)에 투수계수를 추계적으로 분포시키는 해석 개념이다. 따라서 연속체 해석모델을 통해서도 암반내 투수계수의 불균질성을 고려할 수 있으며 지하수 유속이나 이동시간 등에 대한 통계적 해석이 가능함으로써 지하수 유동 해석에 대한 불확실성

해석에 장점을 가진다. 이 모델은 모델 내 균열수의 제한으로 광역 지하수 유동해석의 단점을 가지는 단열망 모델에 비해서 확률밀도함수와 베리오그램으로부터 광역의 해석 영역에 대해서 투수계수를 분포시켜서 모델을 구성할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 추계적 연속체 해석모델은 영역확대 해석에 매우 유리하며 광역규모에서의 투수계수의 불균질한 분포를 고려할 수 있는 특징을 가진다고 할 수 있다.

투수계수의 공간적 분포를 위해서는 지구통계학적 분석 기법의 적용을 필요로 하는데, 자료의 공간적 분포특성을 분석에 가장 널리 사용되는 도구는 베리오그램이며, 구형모델(Spherical model), 지수모델(Exponential model) 그리고 가우시안 모델(Gaussian model) 등이 일반적으로 많이 사용되고 있다. X, Y 그리고 Z방향의 소블록의 투수계수가 모두 로그정규분포를 보여 주는 단열망 모델에서 8개의 수직단면에 대해 베리오그램을 구형 또는 지수모델로 정의하여 투수계수를 추계적으로 발생시킨 수치실험을 통해서 단열망 모델과 추계적 연속체 모델에 대해서 유속이동시간을 상호 비교해 본 결과, 확률밀도함수와 베리오그램으로 구성된 추계적 해석모델은 단열망 해석모델의 좋은 대안 모델이 될 수 있음을 알 수 있었다[3].

2.2 데이터 생성 프로그램

불균질 매체에 대한 투수계수의 분포특성과 상관관계를 결정하는 확률밀도함수와 베리오그램 함수로부터 몬테카를로 기법에 따라 영역별로 투수계수를 분포시키는 것은 단일한 투수계수를 입력치로 하는 연속체 해석에 비해서 많은 시간을 필요로 하는 작업이다. 뿐만 아니라 통계적인 결과를 얻기 위해서는 상당한 수의 입력데이터를 개별적으로 생성하여야 하므로 해석결과를 얻기 위해서는 시간과 노력이 필요하다. 그러므로 이러한 단점을 극복하기 위해서는 프로그램을 작성하여 확률론적 해석을 위한 원하는 수의 입력파일을 자동적으로 생성하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 연속체 지하수 유동 및 핵종이동 해석코드인 NAMMU[4]를 이용하여 확률론적 해석을 수행하기 위하여 상기한 개념에 따라서 NAMMU의 입력데이터 파일을 자동적으로 생성할 수 있는 프로그램인 NAMDATA를 개발하였다. NAMDATA 프로그램의 특성 및 활용성에 관해 그림 2에 간략하게 기술하였다. 이 프로그램은 투수계수 및 공극율에 대한 정규분포(Normal distribution) 함수를 결정하는 평균과 표준편차, 그리고 베리오그램 함수의 유형과 베리오그램을 정의하는 상관거리(Correlation length)를 입력치로 한다. 다른 입력치로는 모델의 형상자료로써, 모델을 구성하는 좌표와 유한요소 분할 개수 그리고 절리가 있을 경우에는 절리의 수와 위치, 그리고 간극에 대한 정의이다. 이러한 입력치로부터 개발된 프로그램은 자동적으로 유한요소망의 좌표를 정의하고 각 유한요소에 투수계수를 할당하게 되며 사용자의 선택에 따라서는 공극률도 확률분포 함수에 따라서 요소별로 값이 할당된다. 그리고 모델 영역내 절리의 좌표와 투수계수 값도 정의된다. 이러한 프로그램의 출력은 NAMMU에서 요구되는 입력파일의 형식과 동일하므로 출력의 수정없이 NAMMU 입력파일로 손쉽게 사용할 수 있다.

상기 과정을 통해서 사용자가 원하는 수 만큼의 NAMMU 입력파일을 생성하고 이를 일괄(Batch) 파일로 처리해서 NAMMU의 해석결과를 구할 수 있다. 그러므로 이러한 NAMMU 입력 파일의 자동화 생성 과정을 통해서 결정론적 해석 코드인 NAMMU를 확률론적으로 손쉽게 이용할

수 있다는 장점을 가지게 된다.

2.3 프로그램 사용절차

요소망 생성을 위해 Visual Basic 언어로 작성된 이 프로그램은 세 부분으로 나누어져 있는데 프로그램의 입력자료 작성을 위한 “Pregrid”, “요소망 생성 프로그램(Main)”, 마지막으로 결과파일을 확인하는 “Gridshow”로 구성되어 있다. 프로그램 실행순서는 그림 3에 제시되어 있다. 먼저 입력파일 작성에는 이미 설명한 바와 같이 투수계수나 공극율의 분포함수와 베리오그램을 정의하는 물성자료와 모델을 구성하는 형상자료의 입력이 필요하다. 이 입력자료를 바탕으로 예비 요소망을 생성하기 위해 “Pregrid” 프로그램을 실행한다. 이는 크게 나누어진 모델을 몇 개의 요소로 세분할 것인지를 결정한다. 여기서는 각 patch에 대해 상, 하, 좌, 우를 지정해 준 다음 각 선분의 분할 개수를 지정해 주어 파일을 만들어 요소생성 프로그램의 입력자료를 만든다. 그림 4는 “Pregrid”를 실행한 후의 window이다. 그림에서 제시된 것처럼 전체 patch들의 모습이 나타나고 patch 번호를 변화 시키면서 patch의 위치를 확인할 수 있으며 각 patch에 해당하는 선분의 번호를 알 수 있다. 이 patch 그림은 확대가 가능하고 위치를 이동시킬 수 있으며 각 patch에 대한 분할은 그림의 오른쪽 부분에서 조정할 수 있다. 즉, “Pregrid” 실행 후에는 사용자가 원하는 수만큼의 큰 영역(patch)으로 분할된다. 이후 각 patch를 원하는 수 만큼의 요소로 분할하고 fault를 지정하는 과정이 필요하다. 그림 4와 같이 각 patch의 번호와 선분의 번호를 확인한 다음 각 patch의 상하좌우의 선분 분할 수를 정의함으로써 요소 분할을 완성할 수 있다. 그런 다음 “ 요소망 생성 프로그램(Main) ” 은 “Pregrid”에 의해 만들어진 입력자료와 물성 자료로부터 요소망을 만들고 투수계수값과 공극률 값을 계산하여 최종적으로 NAMMU의 해석에 사용될 출력파일을 생성한다. 이 출력된 파일은 NAMMU의 입력파일과 동일한 양식으로 이루어진다. 생성된 요소망의 확인을 위한 후처리 프로그램이 “ Gridshow ” 이다. Gridshow를 통해 요소망뿐만 아니라 각 요소의 투수계수 값의 분포와 절리의 형상 등을 그림 5와 같이 볼 수 있다.

3. 확률론적 지하수 유동 해석을 위한 데이터 생성 프로그램 활용

3.1 해석모델

본 프로그램의 적용성 분석을 위하여 가상의 2차원 해석모델을 설정하고 추계적 모델을 사용하여 지하수 유동시간, 유동경로 길이에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 그림 6은 가상의 2차원 단면모델의 개념도와 경계조건을 보여준다. 해석모델의 왼쪽 경계면으로부터 300m 지점에 지표면으로부터 70m 길이의 우물이 설치되어 1 ton/day의 용량으로 지하수를 양수한다고 가정하였다. 이러한 우물 모델은 일반적으로 방사성폐기물 처분장의 안전성평가를 위한 가장 보수적인 시나리오 중 하나이다. 해석모델의 상부면은 지하수위를 나타내며 지하수위에 해당하는 경계조건을 설정하였다. 왼쪽 경계면의 높이는 해수면 기준으로 110m, 오른쪽 경계면은 0m로

가정하였으며 하부면은 -110m 이다. 경계조건으로 왼쪽면은 no-flow 조건이며 우측면은 지하수위를 고려한 일정 압력조건을 두었다. 그림에서와 같이 좌측의 지표면 하부 80m 지점에 처분동굴이 위치한다고 가정하였으며 4개의 지점을 설정하여 이 지점들로부터 출발하는 지하수 유동 경로에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 유한요소망의 크기는 단열망 모델에서 투수계수의 확률밀도함수와 베리오그램을 구하기 위한 분할 간격이 10m인 점을 고려하여 10m로 등분할 하였다. 해석모델에서 유동로의 출발지점은 그림에서와 같이 a, b, c, d 네 지점으로써 좌측 경계면으로부터 각각 10, 20, 30, 40 m 거리이다.

3.2 입력자료 생성 및 해석

먼저 현장자료[5]에 근거하여 소규모 블록에 대한 4가지 투수계수분포 모델을 생성하였다. 이어서 4개의 모델을 대상으로 각 모델별로 8개의 수직 단면별로 구한 확률밀도함수와 베리오그램 함수를 구하였다[6]. 4개 모델의 각 8개의 수직 단면별로 구해진 확률밀도함수와 베리오그램 함수에 대해서 3개의 서로 다른 seed에 대해 몬테카를로 방식에 따라 2차원 단면의 추계적 연속체 모델에 투수계수를 분포시켰으며, 전체 96개(4x8x3)의 해석세트를 구축하여 해석결과에 대한 확률론적 분석이 가능하도록 하였다.

그림 7은 96개 세트에 대해서 각 모델의 입력치로 사용된 요소별 투수계수의 산술평균 분포를 보여 준다. 평균은 약 $8.5x10^{-16}$ m^2 이며 정규분포에 근접한 분포를 나타내고 있다. 표 1은 전체 96개 세트에 대한 해석결과를 정리한 것이다. 4개의 출발점에서의 유동경로는 최고치와 최저치가 큰 차이를 보이지 않는데 이것은 유동경로는 투수계수의 불균질성보다는 압력조건에 더 큰 영향을 받기 때문이다. 그러나 유동시간은 최저와 최고가 약 2배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 96개 세트는 통계적으로는 동일한 수리 특성을 가지는 모델이지만 투수계수의 분포특성에 따라 이동 시간의 차이가 발생할 수 있음을 보여준다. 그림 8은 4개의 출발점에서의 유동경로에 대한 유동시간의 분포를 나타낸다. 따라서 이러한 해석결과는 결정론적 해석방법에 비해 지하수유동 해석의 확률론적 해석이 가능함을 보여 준다.

4. 결 론

본 연구에서는 추계적 연속체 해석모델에 사용하기 위한 입력자료 생성 프로그램(NAMDATA)을 개발하고 가상 모델에 대한 활용을 통해 해석결과가 방사성폐기물 처분장의 확률론적 안전성 평가 모델의 유효한 입력치가 될 수 있음을 보였다.

NAMDATA 프로그램은 추계적 연속체 해석모델의 구성을 위해 단열망 모델을 소블록으로 분할하고 각 소블록의 투수계수를 계산하여 이를 연속체 모델의 동일 위치의 블록에 대한 입력치로 사용하는 일련의 프로세스를 수행하여 결정론적 지하수 유동 해석 코드인 NAMMU의 입력 데이터 파일을 자동적으로 생성하기 위한 것이다.

2차원 가상단면에 대해서 통계적으로 동일한 96 개의 투수계수 분포세트를 구성하여 추계적 지

하수유동 해석을 실시한 결과 투수계수의 불균질성에 따라 동일한 경로에 대해서 유동시간은 최저 대 최고 비율이 2배 가까이 차이를 보였다. 따라서 해석모델이 일정규모에서 유사한 투수계수로 정의된다고 하더라도 투수계수의 불균질한 분포특성에 따라 지하수 유동시간은 차이가 클 수 있음을 알 수 있다. 이러한 추계적 지하수 유동해석의 결과는 지하수 유속이나 유동시간에 대한 적절한 확률분포함수로 나타낼 수 있으므로 방사성폐기물처분장의 확률론적 안전성 평가에 보다 타당성 있는 입력자료를 제시할 수 있음을 보여 준다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] S.P. Neumann & J.S.Depner, Stochastic theory of field-scale Fickian dispersion in anisotropic porous media, Water Resource Research, Vol. 23, No.3 (1987).

[2] S.P. Neumann & J.S. Depner, , Use of variable scale pressure test data to estimate the log hydraulic conductivity and dispersivity of fractured granites near Oracle, Arizona, Journal of Hydrology, Vol.102, pp475-501 (1988).

[3] 장근무 외, 개별균열 연결망 모델에 근거한 추계적 연속체 모델의 구성기법과 두 모델간의 적합성 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제11권 2호 (2001).

[4] L.J. Hartley, C.P. Jackson & S.P. Watson, NAMMU User Guide, AEA-ES-0318 (1996).

[5] 이은용 외, 저준위방사성폐기물처분장 수리모델 구성기법 연구 2차년도 보고서, 99원환기-단 28, 한국전력공사 원자력환경기술원 (1999).

[6] 장근무 외, 단정주입시험 결과를 이용한 단열암반의 수리전도도 분석, 대한지질공학회 제 10권 1호 (2000).

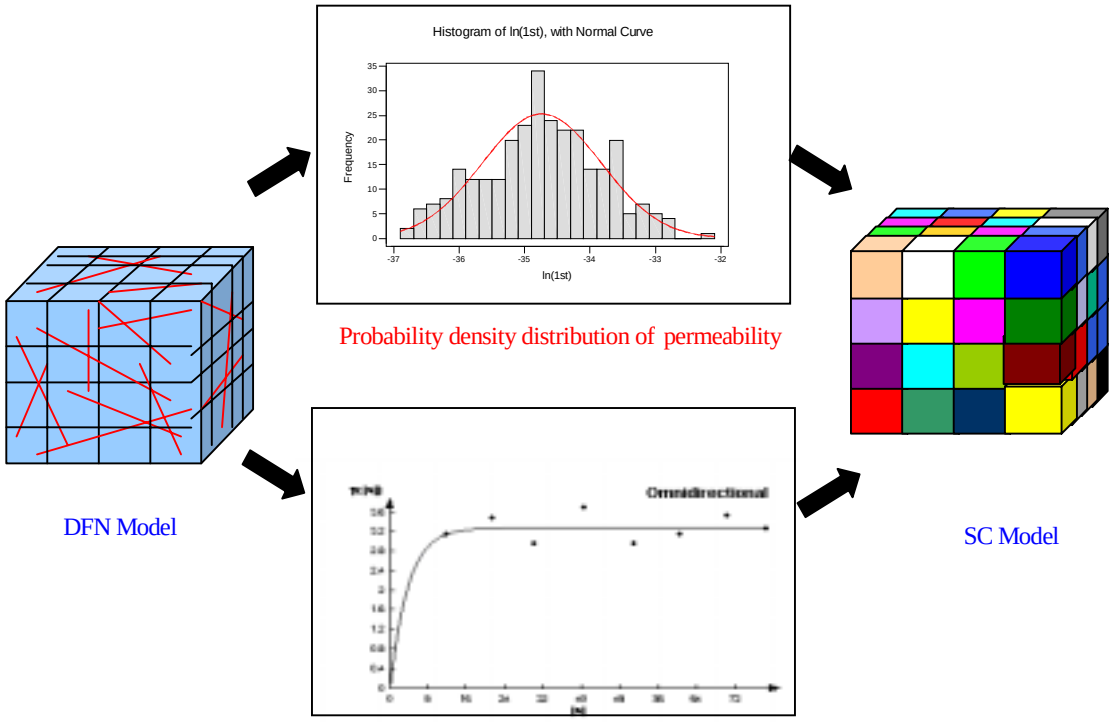


그림 1. 단열망 모델로부터 추계적 연속체 모델 구축 방법

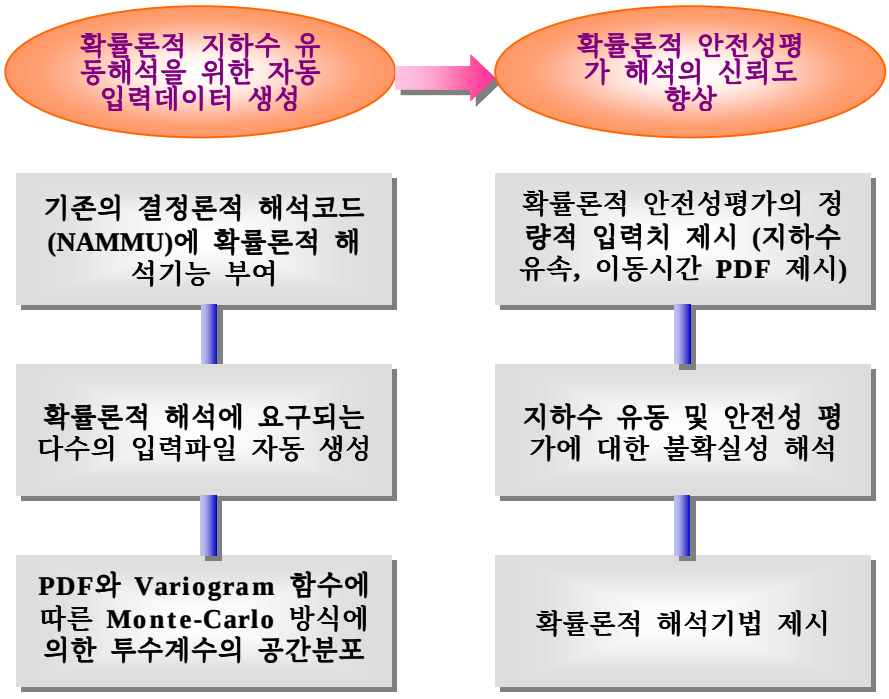


그림 2. NAMDATA 프로그램 특성 및 활용성

그림 3. 프로그램 실행순서

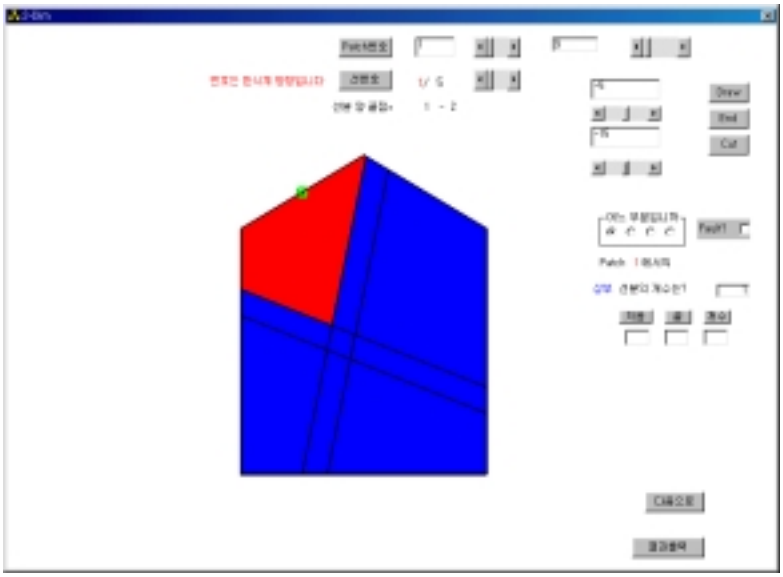


그림 4. Pregrid의 실행 Window

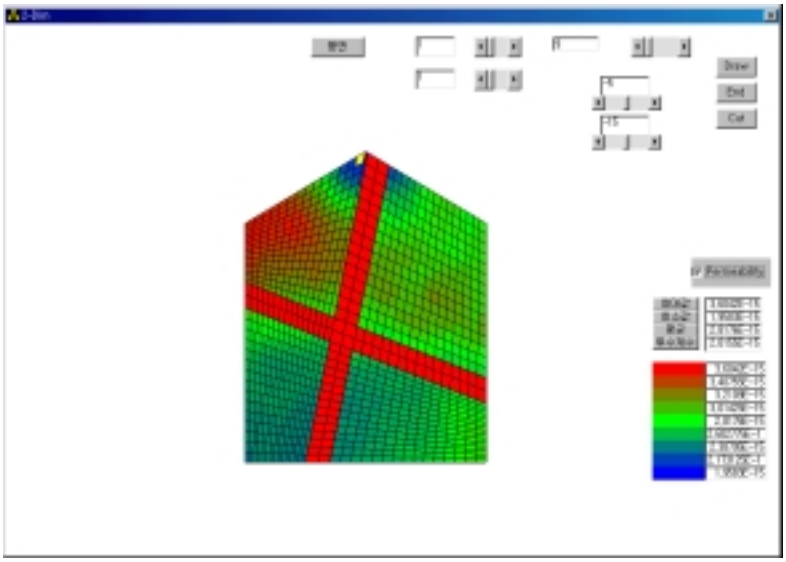


그림 5. Gridshow의 실행 Window(투수계수값 출력)

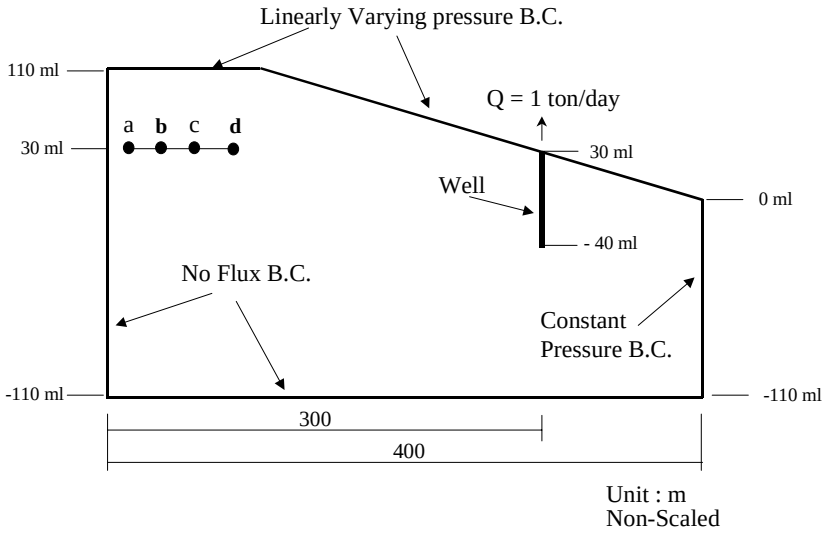


그림 6. 해석모델의 모식도와 경계조건

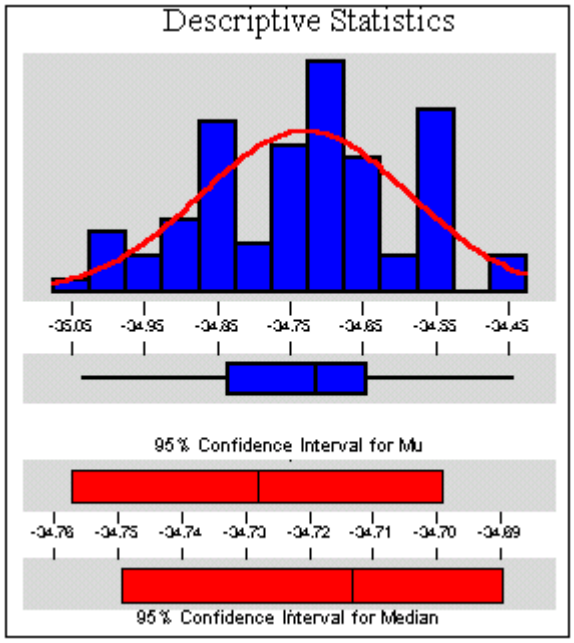
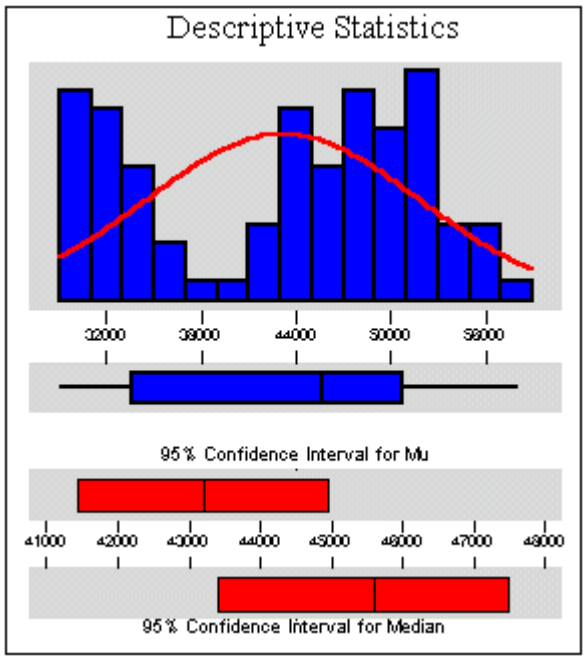


그림 7. 96개 해석세트에서 각 모델의 입력치로 사용된 요소별 투수계수분포

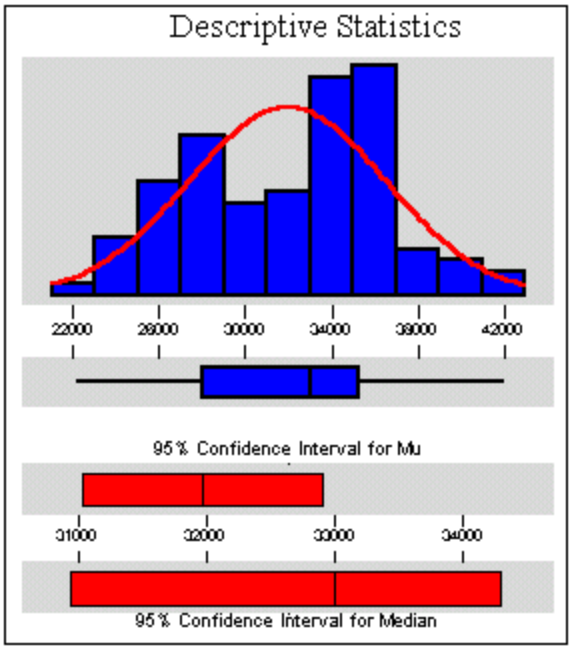
표 1. 지하수 유동경로별 이동시간과 이동거리에 대한 결정론적 해석과 확률론적 해석간의 비교

Pathway No.	Travel Time(yr)									Path Length(m)				
	Min	25%	50%	75%	90%	Max	Mean	S.D.	*DA	Min	Max	Mean	S.D.	*DA
a	79.7	92.1	125.0	139.0	145.0	118.4	118.4	23.7	116.0	409	459	434.8	16.2	453.4
b	60.8	76.7	90.4	96.7	101.0	87.6	87.6	12.5	89.1	375	421	395.8	14.0	411.8
c	45.5	59.4	68.1	80.0	84.3	69.4	69.4	11.3	73.6	336	388	367.1	20.0	380.9
d	43.0	47.8	56.7	62.0	63.8	57.8	57.8	7.9	62.8	323	372	341.4	13.2	354.4

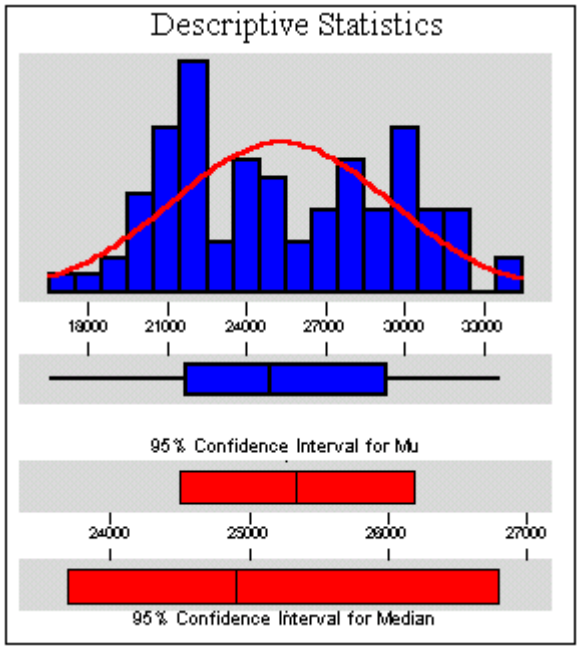
*DA : 그림 7의 평균 투수계수(8.5×10^{-16} m^2)를 입력값으로 한 결정론적 해석결과



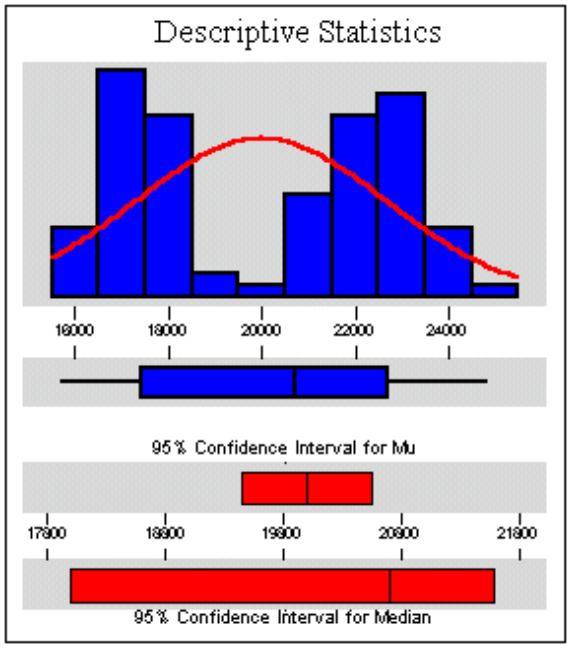
(a) pathway a



(b) pathway b



(c) pathway c



(d) pathway d

그림 8. 4개의 지점(a, b, c, d)에서 출발하는 이동로의 이동시간(day) 분포