

개별균열 연결망 모델에 근거한 추계적 연속체 모델의 구성기법과 두 모델간의 적합성 분석

장근무¹⁾ · 이은용²⁾ · 박주완³⁾ · 김창락⁴⁾ · 박희영⁵⁾

A Methodology to Formulate Stochastic Continuum Model from Discrete Fracture Network Model and Analysis of Compatibility between two Models

Keunmoo Chang, Eun-Yong Lee, Joo-Wan park, Chang-Lak Kim and Hi-Young Park

Abstract. A stochastic continuum(SC) modeling technique was developed to simulate the groundwater flow pathway in fractured rocks. This model was developed to overcome the disadvantageous points of discrete fracture network(DFN) model which has the limitation of fracture numbers. Besides, SC model is able to perform probabilistic analysis and to simulate the conductive groundwater pathway as discrete fracture network model. The SC model was formulated based on the discrete fracture network(DFN) model. The spatial distribution of permeability in the stochastic continuum model was defined by the probability distribution and variogram functions defined from the permeabilities of subdivided smaller blocks of the DFN model. The analysis of groundwater travel time was performed to show the consistency between DFN and SC models by the numerical experiment. It was found that the stochastic continuum model was an appropriate way to provide the probability density distribution of groundwater velocity which is required for the probabilistic safety assessment of a radioactive waste disposal facility.

Keywords: stochastic continuum model, discrete fracture network model, probability distribution function, variogram function, numerical experiment, groundwater travel time

초 록. 균열암반에서의 지하수 유동 모사를 위한 추계적 연속체 모델링 기법이 개발되었다. 추계적연속체 모델은 균열수의 제한을 가지는 개별균열연결망 모델의 단점을 극복할 수 있다. 뿐만 아니라 개별균열연결망 모델에서 가능한 확률론적 해석과 전도성이 큰 균열을 통한 지하수 유동을 근접하게 모사할 수 있는 장점을 가진다. 추계적연속체 모델은 개별균열연결망 모델에 근거하여 생성된다. 개별균열연결망 모델은 일정크기의 소블록으로 나누어지며 각 소블록 투수계수의 확률밀도함수와 베리오그램 함수로부터 추계적연속체 모델에서의 투수계수의 공간적 분포를 정의할 수 있다. 이 연구에서 추계적연속체 모델과 개별균열연결망 모델의 적합성을 보여 주기 위하여 수치실험을 통하여 지하수 유동 이동시간을 계산하고 상호 비교하였다. 그리고 추계적연속체 모델은 방사성폐기물 처분장의 확률론적 안전성 평가를 위해 필요한 지하수 유동속도의 확률분포를 제공할 수 있는 모델임을 제시할 수 있었다.

핵심어: 추계적연속체 모델, 개별균열연결망, 확률밀도함수, 베리오그램 함수, 수치실험, 지하수유동 이동시간

1. 서 론

방사성폐기물 처분장으로부터 유출된 방사성 핵종은 대부분 지하수 흐름을 따라서 이동한다. 그러므로 균열

이 발달된 암반에서의 핵종 이동은 균열의 연결성과 개별 균열의 수리전도성에 상당한 영향을 받는다고 할 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 개별균열 연결망 모델(Discrete Fracture Network, 이하 DFN으로 명기)은 지하수 경로를 통한 핵종이동 해석에 매우 적합한 모델이다. 이 해석모델은 균열의 기하적, 수리적 특성에 대한 통계적 자료를 입력치로 하므로 통계적으로 동일한 모델을 원하는 수만큼 생성할 수 있다. 그러므로 해석 결과에 대해서도 통계적 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그리고 등가 연속체 해석모델과 비교하여 지

¹⁾정회원, 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 선임연구원

²⁾한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 책임연구원

³⁾한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 선임연구원

⁴⁾한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 처분연구그룹장

⁵⁾한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 위촉연구원

접수일 : 2001년 3월 8일

심사 완료일 : 2001년 4월 18일

하수 유속이나 이동시간의 확률론적 분포특성을 평가할 수 있으며 이 결과는 방사성폐기물 처분장의 확률론적 안전성 평가에 중요한 입력자료가 될 수 있다. 현재 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가에 관한 과학기술부 고시에는 결정론적 해석과 더불어 확률론적인 해석결과를 제시하도록 하고 있다. 그러므로 DFN 해석모델은 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가에 특히 유용한 해석모델이라고 볼 수 있다.

그러나 DFN 모델은 계산용량의 한계로 인한 균열수의 제약으로 광역 지하수 유동해석에는 한계가 있다. 그러므로 시추공조사 등을 통해서 관별된 배경(Background) 균열을 모델에 포함시키기에는 어려운 점이 있다. 이를 극복할 수 있는 대안으로 추계적 연속체(Stochastic Continuum, 이하 SC로 명기) 지하수 유동 해석 모델을 제시 할 수 있다. Neumann은 균열암반에서의 지하수 유동을 위한 추계적 해석기법을 제안하였다.^{1,2)} 이 해석방법에서는 불균질한 수리 특성을 가지는 대상 암반을 소블록으로 분할하고 수리 상수의 확률분포 특성에 따라서 각 블록마다 수리상수를 설정하여 SC 해석모델을 구축하였다.

이러한 SC 해석모델은 DFN 모델의 장점을 최대한 구현한 모델로써 기존의 등가다공성 해석모델과 비교하여 지하수 경로에 따른 이동시간의 다양성을 해석할 수 있다. 그리고 수리전도도의 공간적 분포 특성을 정의하는 확률밀도함수와 베리오그램(Variogram) 함수로부터 난수를 달리하며 동일한 수리 특성을 가지는 모델을 다수 구현할 수 있으므로 확률론적 해석이 가능하다.

이 연구에서는 상기한 개념에 근거하여 DFN 모델로부터 SC 해석모델을 구축하는 기법을 제시하였다. DFN 모델은 전남 여수시의 연구부지에서 수행된 시추공 시험과 현장균열 조사로부터 수리전도성 균열을 분별하여 3차원 DFN 모델을 구성하였다. 그리고 DFN 모델을 일정 체적의 소블록으로 분할하고 각 소블록의 투수계수를 계산하였다. 이로부터 투수계수의 공간적 분포특성을 정량적으로 제시할 수 있는 확률밀도함수와 베리오그램 함수가 정의되었다. SC 해석모델의 유한요소망은 DFN 해석모델과 동일한 체적규모로 분할되고 각 요소의 투수계수는 확률밀도함수와 베리오그램 함수들에 근거하여 설정되었다.

SC 해석모델의 검증은 위하여 정육면체 DFN 모델을 구성하고 간단한 경계조건하에서 수치실험 모델을 수행하여 유속이동 시간을 계산하였다. 이 결과를 동일한 조건하에서 수행된 SC 해석모델에서의 유속이동 시간과 상호 비교하여 SC 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이 해

석에서는 Napsac³⁾ 과 Nammu⁴⁾를 사용하여 DFN 유동 해석과 연속체 해석을 수행하였다.

2. 개별균열 연결망 모델에 근거한 추계적 연속체 모델의 구성기법

2.1 개별균열 연결망 모델의 구성과 대표요소체적 정의

일반적으로 암반은 일정 체적에 도달함에 따라서 평균적인 수리 특성을 나타낸다. 이 연구에서는 DFN 모델로부터 투수계수의 평균적인 공간적 분포특성을 정의하기 위해서 먼저 DFN 모델의 대표요소 체적을 정의하였다.

DFN 모델은 여수 지역의 실험부지에서 지표면 이하 약 20~100 m 범위의 4 개의 시추공에서 수행된 각종 공내조사 및 수압시험, 그리고 지표조사 결과로부터 균열군과 균열길이, 방향 그리고 균열 유효수리 간극을 정의하였다.⁵⁾ 균열 유효수리간극은 시추공 주입시험으로부터 얻어진 투수량 계수(Transmissivity)를 삼승법칙에 따라서 계산하였다. Table 1은 DFN 모델의 구성을 위한 입력자료를 보여 준다. DFN 모델의 투수계수는 Napsac으로 계산되었으며 이론적 방법의 서술은 장근무⁶⁾의 연구결과에 설명된 바 있다.

Fig. 1은 DFN 모델의 체적 증가에 따른 투수계수의 변화를 보여 준다. 해석은 7개의 난수로부터 발생된 DFN 모델에 대해서 수행되었다. 해석결과, 투수계수의 변화는 한 번의 길이가 60 m인 정육면체의 규모에 이르면서 거의 안정화되면서 한 번의 길이가 80 m인 블록규모에서도 큰 변화를 보이지 않는다. 대표요소 체적을 단정적인 값으로 정하기는 어려우나 대략 80×80×80 m³ 정도의 규모로 정의할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Statistical description of fractures.

		Set 1	Set 2	Set 3
Density(m ⁻³)		0.01075	0.01563	0.00175
	Distribution	3-D Poisson Process		
Length(m)	Min.	1.0	1.0	1.0
	Max.	8.0	10.0	20.0
	Exponent	1.203	1.490	2.038
	Distribution	Truncated Power Law		
Transmissivity (m ²)	Mean	-12.68		
	S.D.	0.619		
	Distribution	Log-normal		
Dip & Dip Dir. (angle)	Mean of Dip Dir.	28.0	7.7	104.3
	Mean of Dip Angle	9.4	83.1	86.8
	Fisher Dispersion	16.58	10.63	30.64
	Distribution	Fisher		

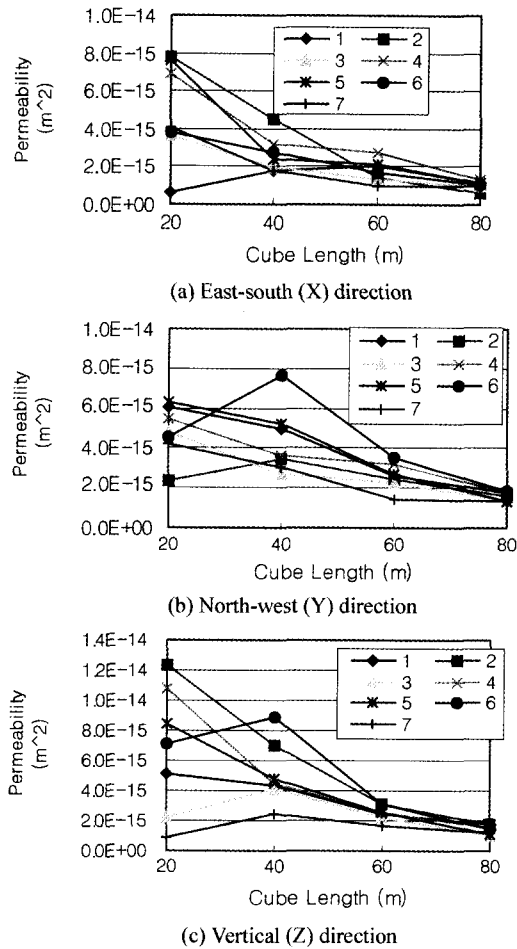


Fig. 1. Permeability versus cube length.

그러므로 이 규모에 대해서 대상암반의 평균적 수리 특성을 구하는 것이 적절할 것으로 판단되며 DFN 모델에서 SC 모델의 구성도 이 체적규모에서 수행되는 것이 타당할 것으로 본다.

계산된 수리전도도의 X(동쪽방향), Y(북쪽방향) 그리고 Z(수직방향) 방향의 산술평균은 다음과 같다. 일반적으로 암반의 투수계수는 산술평균과 기하평균의 사이값으로 알려져 있으나, 이 연구에서는 계산된 3차원 투수계수 텐서와 시추공 시험 결과의 대략적인 비교를 위한 목적이므로 간단히 산술평균을 계산하고 이를 시추공 수리시험의 산술평균 결과와 비교하였다.

$$\begin{vmatrix} 1.03 \\ 1.68 \\ 1.53 \end{vmatrix} \times 10^{-15} \text{m}^2 \quad (1)$$

현장에서 수행된 시추공 수리시험에서의 투수계수의 산술 평균값은 약 $1.7 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 이다.⁵⁾ 이 값은 DFN 모델로부터 계산된 값과 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 DFN 모델은 현장 수리특성과 부합됨을 알 수 있다.

2.2 추계적 연속체 해석모델의 구성기법

Fig. 2는 DFN 모델로부터 SC 해석모델을 구축하는 기법을 보여준다. 그림에서와 같이 먼저 $80 \times 80 \times 80 \text{m}^3$ 체적규모의 통계적으로 동일한 7개의 서로 다른 DFN 모델을 구축하였다. 각 모델은 한 변의 길이가 10 m인 정육면체 소블록으로 분할하여 전체 소블록이 $8 \times 8 \times 8$ 의 512개가 되도록 하였다. 그리고 각 소블록들의 투수계수를 계산하였다. 이 결과로부터 X, Y 그리고 Z 방향의 투수계수의 확률밀도함수를 정의할 수 있다.

투수계수는 수리전도성 균열의 방향과 길이에 영향을 받으므로 일정 거리 내에서 투수계수는 서로 상관성을 가진다고 볼 수 있다. 그러므로 정육면체 임의의 소블록의 투수계수는 인접 블록의 투수계수에 무관하지 않음을 예상할 수 있다. 이러한 변수의 공간적 분포특성을 정의하기 위해서는 베리오그램 함수가 적절하다. 이 연구에서도 각 소블록의 투수계수로부터 베리오그램 함수를 구하여 투수계수의 공간적 분포특성을 정의하였다.

SC 모델은 DFN 모델과 동일한 크기의 정육면체 소블록으로 나뉘어지며 이 블록들의 투수계수는 확률밀도함수와 베리오그램 함수에 따라서 분포된다. 확률밀도함수와 베리오그램 함수로부터 투수계수의 통계적 발생을 위하여 송명규 등⁷⁾에 의해서 제안된 균열간극 발생 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램에서 사용된 베리오그램 함수는 구형(Spherical) 및 지수(Exponential) 함수이다.

3. 추계적 연속체 모델과 개별균열 연결망 모델의 상호적합성 평가

3.1 수치실험 개요

DFN 모델과 이 모델로부터 구성된 SC 모델의 적합성을 비교 검증하기 위하여 수치실험을 수행하였다. 수치실험은 DFN 모델과 아래의 두 유형의 SC(I), SC(II) 모델을 대상으로 하였다. 해석은 각각 7개의 난수로 발생된 DFN 모델과 이로부터 구성되는 각 7개의 SC(I), SC(II) 모델에 대해서 수행되었다.

(1) SC(I)모델 : DFN 모델에서 계산된 $8 \times 8 \times 8$ 소블록의 512개 투수계수를 연속체 모델내 동일한 위치

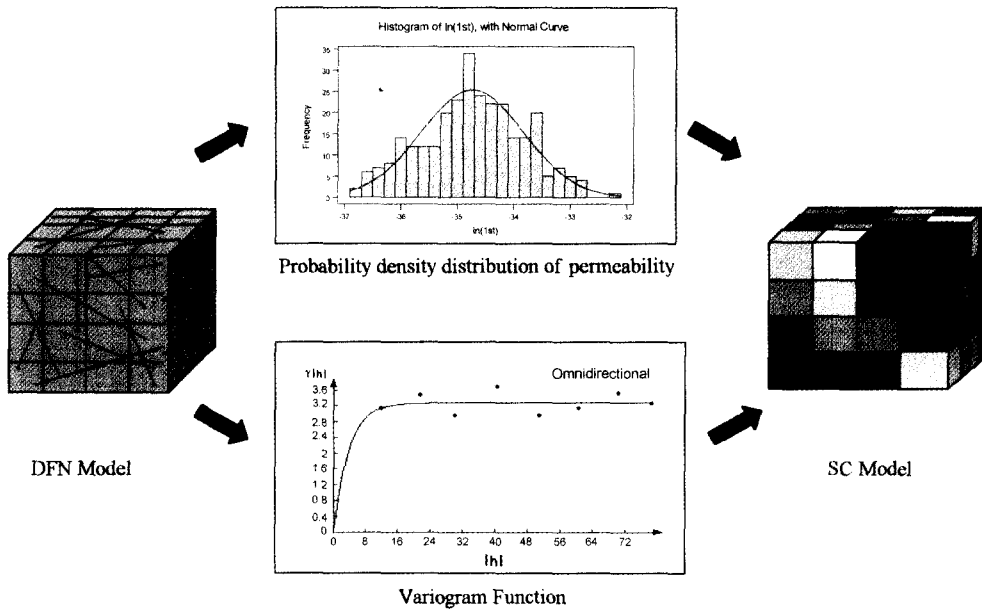


Fig. 2. A methodology to formulate SC model from DFN model.

의 유한요소망에 입력치로 하는 모델.

(2) SC(II)모델 : DFN 모델에서 계산된 투수계수의 확률밀도함수와 베리오그램 함수로부터 통계적으로 3차원 공간상에 발생된 투수계수를 입력치로 하는 모델.

수치실험은 먼저 DFN 모델과 SC(I) 모델의 상호 적합성을 검증한 후, 다음 단계에서는 DFN 모델과 SC(II) 모델의 적합성을 최종적으로 평가하였다. 이러한 과정을 통해서 SC 해석모델이 DFN 모델과 적합하며 SC 모델은 DFN 모델의 특성이 반영되는 연속체 모델임을 증명하고자 한다. DFN 모델에서는 입자추적법(Particle Tracking Method)⁸⁾에 근거한 입자들의 이동시간을 계산하였다. 그리고 SC 모델에서는 유동로의 이동시간을 계산하고 이를 DFN 모델의 결과와 비교하였다.

수치실험의 경계조건은 Fig. 3에서와 같이 DFN과 SC의 정육면체 모델에 대해서 Y, Z 방향의 한 수직면에 1 MPa의 압력을 가하고 각각의 마주보는 면에 영의 압력을 가하여 Y, Z 방향의 수리경사(Hydraulic Gradient) 조건을 형성하였다. 각각의 조건에서 나머지 4면에 대해서는 No-Flux 조건을 가하였다.

이러한 압력조건에서 DFN 모델에 대해서는 1,000개의 입자를 압력주입면에 분포시켰다. 입자들은 지하수 이류(Advection)에 따라서 이동하며 분산은 DFN내 서로 다른 이류 속도를 가지는 경로로 발생한다고 가정된

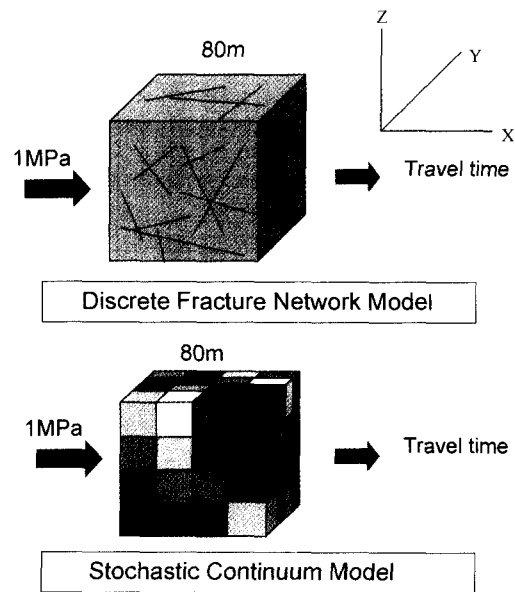


Fig. 3. Boundary Conditions to calculate travel time for SC and DFN models.

다. 절점(Node)과 절점사이의 균열네트워크를 지나는 입자들의 이동이 추적되며 모든 입자에 대해서 전체 이동거리와 시간이 계산된다. 모든 균열면에서 균열 교차선 사이에 하나의 대표적인 유동경로(Pathway)가 계산

된다. 이러한 유동경로는 네트워크 연결도나 균열 투수량계수의 차이로 인해서 각각 다른 값을 보여 주게 된다. 그리고 SC 모델에서 흐름경로는 압력주입면에서 경계면과 접하는 요소를 제외한 36개의 요소의 중심에서 유동로가 출발하도록 하였다.

균열암반에서 지하수 유동속도는 균열 공극(Fracture Porosity)에 반비례한다. 균열공극의 일반적인 범위는

$(0.01 \sim 1) \times 10^{-5}$ 범위이다. 그리고 균열내 지하수 유동은 균열간극의 전체 면적에서 발생하는 것은 아니다. 그러므로 유효균열공극은 이 보다 더 작은 범위라고 할 수 있다. 유효균열공극은 각 난수별 DFN 모델에 대해서 식 (2)로 계산되어 SC모델의 입력치로 사용하였다. 이 연구에서 식 (2)로 계산된 유효균열공극은 $(0.42 \sim 0.86) \times 10^{-5}$ 의 범위이다.

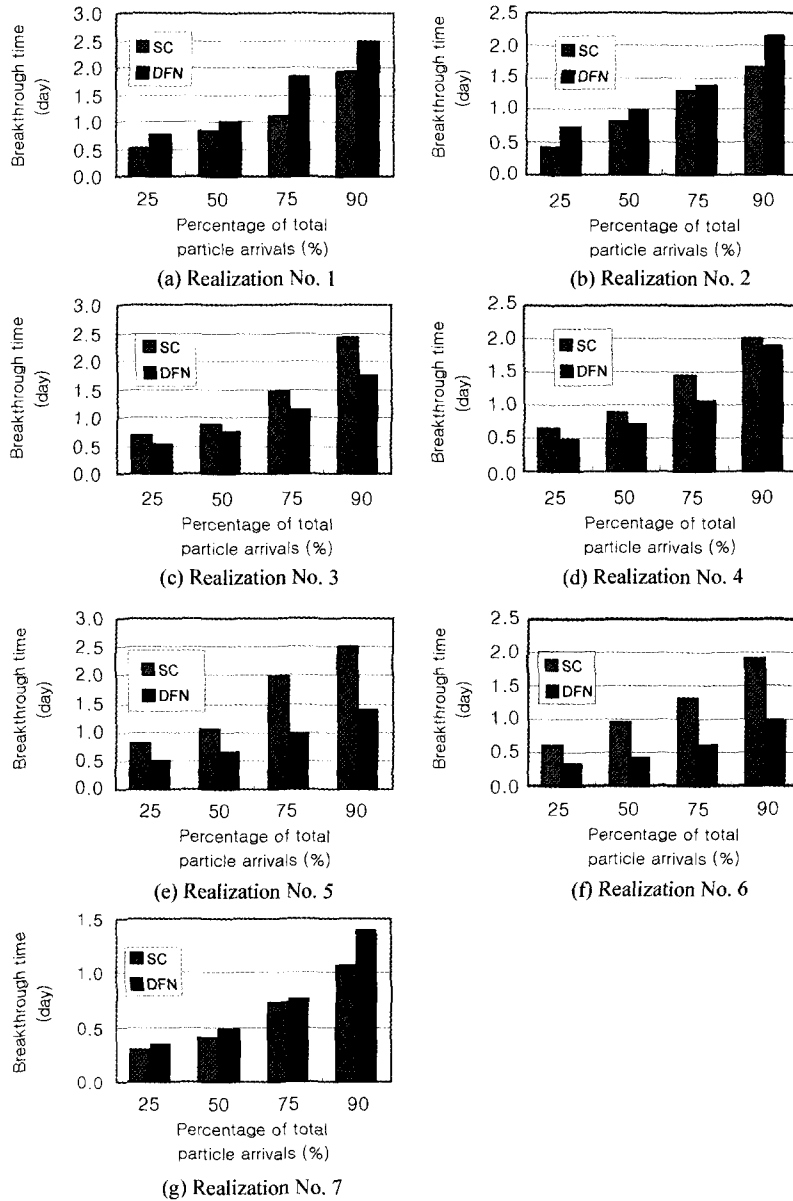


Fig. 4. Comparison of 25, 50 75 & 90% breakthrough times from SC(I) and DFN models (Y direction).

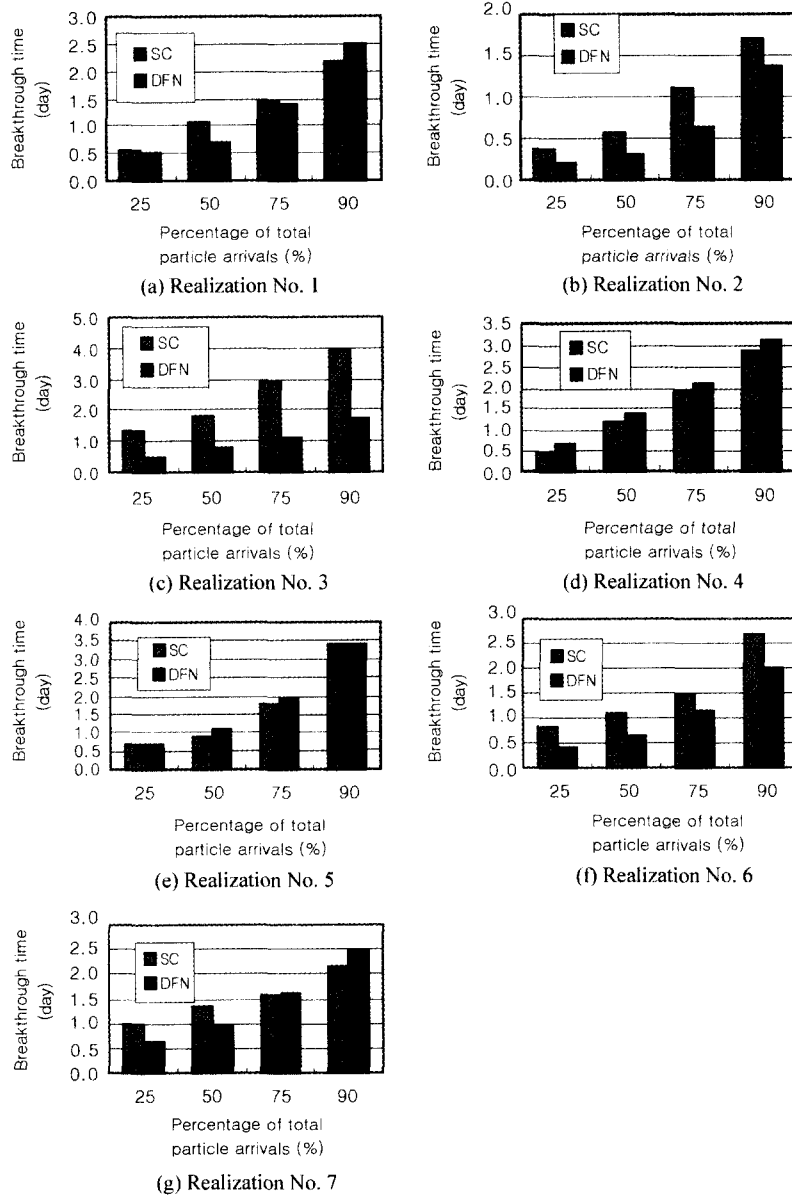


Fig. 5. Comparison of 25, 50 75 & 90% breakthrough times from the SC(I) and DFN models (Z direction).

$$\phi = \frac{T_{50}}{Vol} \times Flux \quad (2)$$

- φ : 유효균열공극율 (Effective Fracture Porosity)
- T₅₀: 전체입자수의 50% 도달시간 (50% breakthrough time of total porosity)
- Flux : 압력 sink 면에서의 유량 (Flux on sink plane)

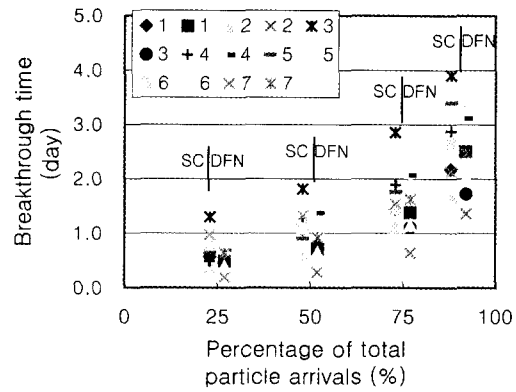
3.2 개별균열 연결망 모델과 SC(I) 모델의 적합성 평가

Fig. 4와 5는 7개의 DFN 해석모델에서의 각각 Y, Z 수리경사 방향에서 1,000개의 전체입자 수의 25, 50, 75, 그리고 90% 도달시간과 동일한 조건에서의 SC(I) 모델의 36 개의 유동로의 25, 50, 75, 그리고 90% 도달 시간을 비교한 것이다. Fig. 4의 Y 방향 수리경사 조건 하에서의 수치실험 결과는 DFN 모델과 SC 모델의 상

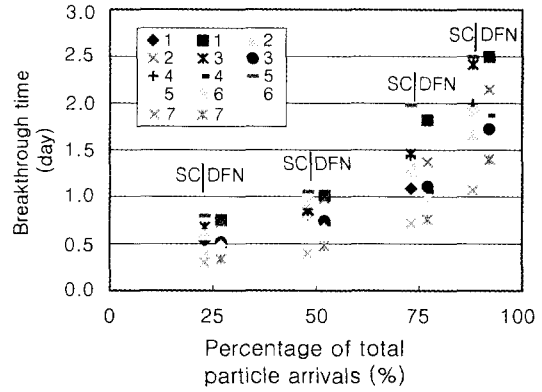
호 적합성이 있음을 보여 준다. 그림에서 난수번호 (5) 와 (6)에서 최고 약 1.8배 정도의 이동시간의 차이를 보여 주지만 나머지 난수에 대해서는 대부분 20-30%의 범위에서 그 결과가 일치하고 있다. 이동시간의 가장 큰 차이를 보여 주는 난수 (3)에서는 DFN 모델에서의 입자 이동 시간이 나머지 DFN 모델의 결과에 비해서 상대적으로 빠름을 볼 수 있다. 이는 DFN 모델이 통계적으로 발생되기 때문에 다른 난수로 발생된 모델에 비해서 연결성이 상대적으로 뛰어난 전도성 균열이 생성될 수 있으며 이러한 특정한 채널을 따라서 입자가 활발히 이동했음을 추측할 수 있다. SC 모델은 10 m 크기의 정육면체내 균열의 평균값을 입력치로 하므로 이와 같이 매우 빠른 채널의 효과를 반영하기에는 어려운 점이 있다고 판단된다. 이러한 점을 극복하기 위해서는 DFN 모델로부터 많은 수의 통계적으로 동일한 SC 모델을 구성하여 해석결과를 분석하는 것이 필요하다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 Z 방향 수리경사 조건에서의 결과를 보여 준다. Fig. 4의 결과에서와 같이 DFN 모델에서의 입자 이동시간과 SC 모델에서의 유동로의 이동시간은 비교적 잘 일치하고 있음을 보여 준다. 단 난수 (3) 모델에 대해서는 큰 차이를 보여 준다. 이는 상기한 바와 같이 DFN 모델에서 전도성이 큰 극소수의 균열을 따라서 입자의 이동이 발생하였으며 SC 모델의 특성상 이러한 극소수의 전도성 균열을 모델에서 반영하기에는 한계가 있기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 6은 Fig. 4와 5를 요약한 그림으로써 Y 방향과

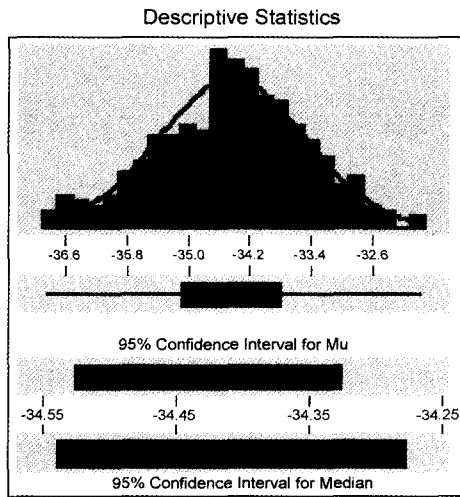


(a) Y direction

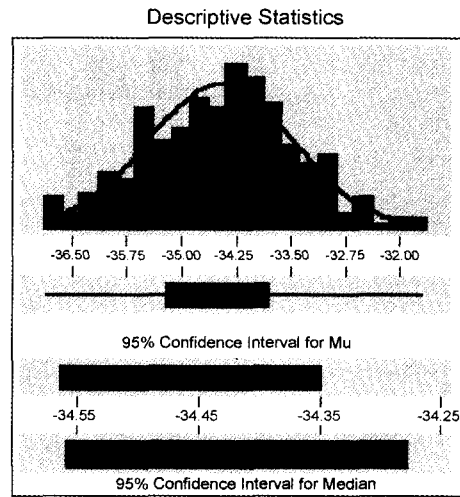


(b) Z direction

Fig. 6. Variation of 25, 50 75 & 90% breakthrough times for 7 realizations of SC(I) and DFN models (Y & Z direction).



(a) Permeability in Y direction



(b) Permeability in Z direction

Fig. 7. Probability density function of permeability for a DFN model of realization No. 6.

Z 방향의 7개의 난수에 대한 DFN 모델과 SC 모델의 25, 50, 75, 그리고 90% 도달시간을 보여 준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 DFN 과 SC 에서의 이동시간의 범위는 매우 잘 부합된다고 할 수 있다. 그러므로 SC(I) 모델은 DFN 모델과 합리적인 수준에서 적합성이 있음을 알 수 있다.

3.3 DFN 모델과 SC(II) 모델의 적합성 평가

이 연구에서는 3.2절에서와 같이 DFN 모델과 SC(I) 모델의 적합성이 있음을 검증한 후, DFN 모델과 SC(II) 모델의 적합성을 평가하고자 한다. SC(II) 모델은 7개의 DFN 모델내 소블록의 X, Y, Z 방향의 확률밀도함수와 베리오그램을 설정하여 이로부터 공간적으로 투수계수가 발생된 7개의 모델을 생성하였다.

Fig. 7은 난수 (6)의 DFN 모델에서 소블록 Y, Z 방향 투수계수의 확률밀도 함수의 한 예를 보여 준다. 이 연구에서 투수계수의 분포는 정규분포나 로그정규분포로 표현될 수 있었다. 그리고 Fig. 8은 X,Y 방향 투수계수의 베리오그램 함수의 한 예를 보여 준다. 베리오그램은 지수형(Exponential) 과 구형(Spherical)으로 나타낼 수 있었다. 베리오그램은 8×8×8 블록의 8개의 수직 단면에 대해서 대해서 정의 되었으며 Fig. 8은 베리오

그램의 한 예를 보여 주는 것으로 난수 (6)의 DFN 모델에서의 3, 4번째 수직단면에서 X 방향과 Z 방향 투수계수의 베리오그램을 보여 준다.

Fig. 9는 난수 (6)의 DFN 모델에서 대한 Y 방향 수 두경사 조건에서의 36개 유동로의 궤적과 이동시간을 보여 준다. 단일 투수계수를 입력치로 하는 연속체 해석의 경우에는 유동로는 모두 직선이며 이동시간도 모두 동일하다고 할 수 있다. 반면에 SC 모델에서는 투수계수의 불균질성으로 인해서 유동로는 굴곡된 모습을 보이며 각 유동로마다 이동시간도 차이를 보여준다. 그러므로 SC 모델에서는 실제 암반에서 나타나는 투수계수의 불균질성을 최대한 반영할 수 있는 연속체 해석 모델이다.

등가연속체 해석에서 수압분포는 일직선의 등분할된 양상을 예상할 수 있으나, 유동로의 굴곡 형상으로도 예상할 수 있는 바와 같이 SC 모델에서 수압분포는 Fig. 10에서와 같이 굴곡된 모습을 보여 준다.

Fig. 11은 7개의 DFN 모델의 1,000개 입자의 25, 50, 75, 그리고 90% 도달시간과 이 모델로부터 각각 발생된 SC(II) 모델에서의 36개 유동로의 25, 50, 75, 그리고 90% 도달시간을 보여준다. 7개의 DFN 모델은 통계적으로 동일한 수리특성을 가지는 모델이며 이로부터

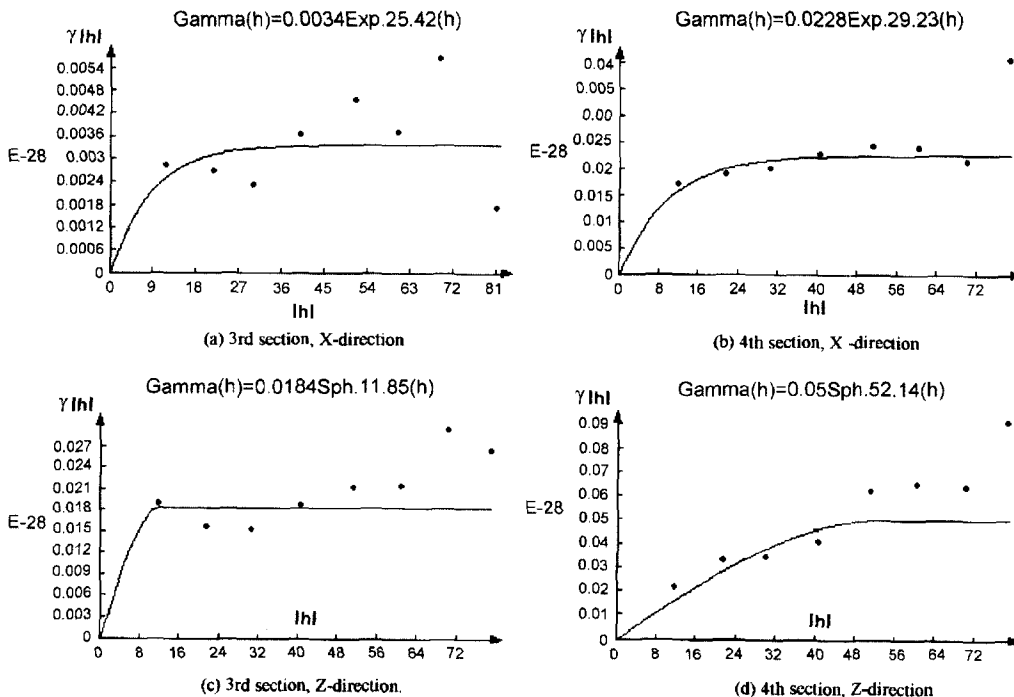


Fig. 8. Variogram functions of permeability for a DFN model of realization No. 6.

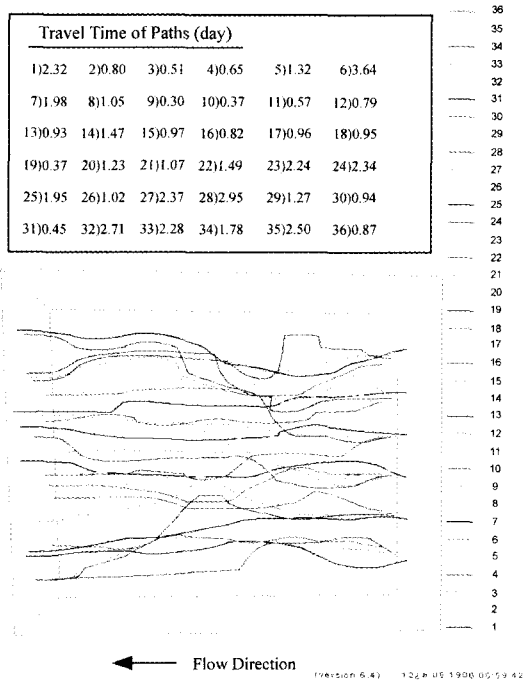


Fig. 9. Travel time and pathways for SC(II) model of realization No. 6 (Y-direction flow).



Fig. 10. Pressure distribution on a normal surface of Y direction for SC(II) model of realization No. 6.

발생된 SC(II) 모델도 역시 통계적으로 동일하다. 그러므로 DFN 모델들에 대한 입자 이동시간과 SC(II) 모델에서 유동로의 이동시간의 범위를 비교하는 것이 의미가 있다. Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 Y 방향과 Z 방향에서 난수에 따른 DFN 과 SC(II)의 이동시간의 범

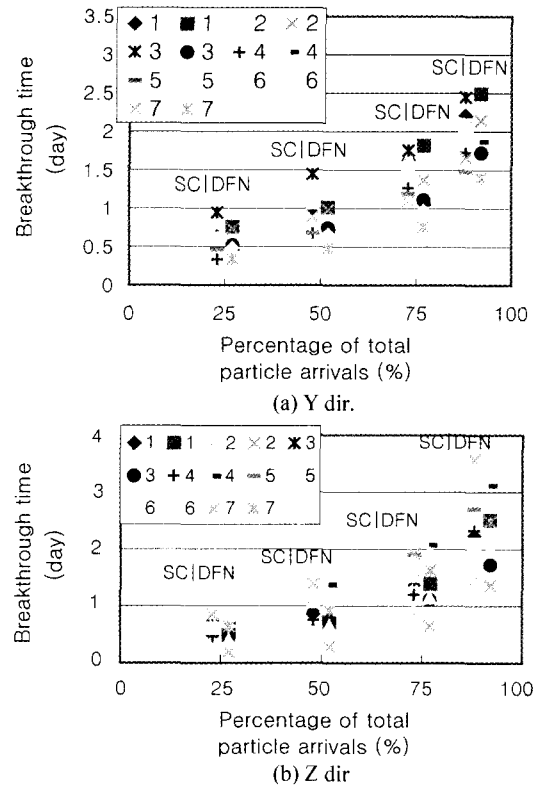


Fig. 11. Variation of 25, 50 75 & 90% breakthrough times for 7 realizations of SC(II) and DFN models.

위는 전체적으로 볼 때 잘 일치한다고 볼 수 있다.

그러므로 SC 모델은 연속체 해석 개념하에서도 DFN 모델에서 가능한 통계적 해석뿐만 아니라 유동로에 따른 이동시간의 차이를 효과적으로 반영할 수 있음을 알 수 있다.

해석모델의 또 다른 장점으로서는 DFN 해석에서 문제가 되는 균열 수의 한계로 인한 모델 크기의 제한이 극복될 수 있다는 점이다. 이는 대표요소 체적 규모에서 구해진 투수계수의 통계적 분포특성을 나타내는 확률밀도함수와 베리오그램으로부터 대표요소체적 이상의 원하는 해석영역에서 투수계수를 공간적으로 분포시켜 모델을 구성하는 것이 가능하기 때문이다. 또 다른 SC 모델의 장점으로서는 Fig. 12에서와 같이 유동속도의 확률밀도분포를 계산적으로 구할 수 있다는 점이다. 일반적으로 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가에서는 확률적인 평가결과가 요구되며 주요한 입력자료 중의 하나는 지하수 유속이나 이동시간의 확률밀도함수이다. 그러므로 SC 해석모델은 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가

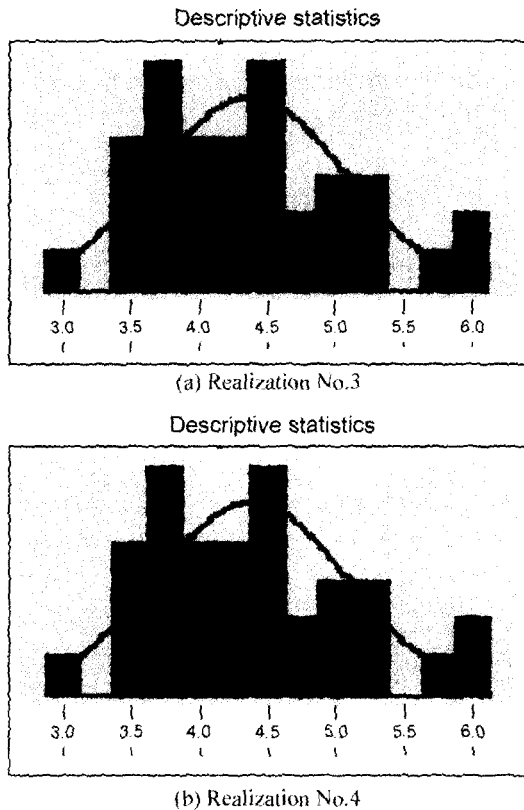


Fig. 12. Probability density distribution of groundwater flow velocity obtained from SC(II) modeling.

의 전 단계 과정으로 매우 유용하게 사용될 수 있는 해석모델이다.

4. 결론 및 토의

이 연구에서는 개별균열 연결망 모델로부터 추계적 연속체 모델을 구성하는 기법을 제시하였다. 그리고 수치실험을 통하여 개별균열 연결망 모델과 추계적 연속체 모델의 적합성을 입증하여 제시한 기법의 타당성을 보여주었다. 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 추계적 연속체 모델 구성기법은 먼저 대표요소체적 규모의 개별균열 연결망 모델을 소블록으로 분할하고 각 소블록의 투수계수를 계산한다. 그리고 소블록 투수계수의 확률밀도함수와 배리오그램으로부터 연속체 모델에서 투수계수의 공간적 분포를 정의하는 방법이다.
- (2) 추계적 연속체 모델의 구성기법에 대한 검증을 위

하여 개별균열 연결망 모델과 추계적 연속체 모델의 적합성을 분석하기 위한 수치실험이 수행되었다. 개별균열 연결망 모델에서 이류를 따라 이동하는 1,000개 입자의 25, 50, 75, 90% 도달시간과 추계적 연속체 모델에서 36개의 유동로의 25, 50, 75, 90% 도달시간은 합리적으로 잘 일치하였다.

(3) 추계적 연속체 모델은 기존의 다공성 연속체 해석모델과는 달리, 개별균열 연결망 해석모델에서 가능한 유동로에 따른 방사성 핵종이나 오염물의 이동시간을 모사할 수 있는 해석모델이다. 그러므로 통계적으로 수리특성이 동일한 모델을 다수 생성함으로써 지하수 유속이나 이동시간에 대한 확률론적인 결과를 제시할 수 있다.

(4) 균열 수의 제한을 가지는 개별균열 연결망 모델과 비교할 때 추계적 연속체 해석모델은 해석영역의 크기에 대한 제약이 매우 작다. 그러므로 추계적 연속체 모델은 배경(Background) 균열의 포함이나 광역의 해석에서 개별균열 연결망을 대체할 수 있는 모델이라고 볼 수 있다. 이러한 문제에 대해서는 향후 실제 현장에서 그 적용성을 심도 있게 검토하는 것이 필요하다고 본다.

사 사

이 연구는 과학기술부 원자력연구개발기금에 의해 수행되었으며 지원에 심심한 감사를 드립니다. 절리간극의 통계적발생 프로그램을 사용하게 해 주신 현대건설 주광수 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. S. P. Neumann & J. S. Depner, 1987, Stochastic theory of field-scale Fickian dispersion in anisotropic porous media, *Water Resource Research* 23(3)
2. S. P. Neumann, & J. S. Depner, 1988, Use of variable scale pressure test data to estimate the log hydraulic conductivity and dispersivity of fractured granites near Oracle, Arizona. *Journal of Hydrology*, 102, 475-501
3. A. W. Herbert & P. M. Wilcock, 1996, Napsac summary document, AEA D&R Report-0271
4. L. J. Hartley, C. P. Jackson & S. P. Watson, 1996, Nammu user guide, AEA-ES-0138
5. 이은용 외, 1999, 저준위방사성폐기물처분장 수리모델 구성기법 연구 2차년도 보고서, 99월환기-단28.
6. 장근무, 1998, 3차원 균열연결망 모델에서의 유효투수계수 평가 및 터널굴착 지하수 유동해석에 대한 수치실험, *터널과 지하공간*, 8, 275-286

7. 송명규, 주광수, 문현구, 1994, 암석질리와 균열망내에서의 채널흐름에 관한 이론적 수치해석적 연구, 터널과 지하공간, 4, 1-16
8. L. Smith & F. W. Schwartz, 1984, An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media, Water Resource Research 20(9), 1241-1252
9. C. P. Jackson & S. P. Watson, 1997, An assessment of the post-closure performance of a deep waste repository at sellafield, Nirex science report 97.



장근무

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel : 042-870-0373
E-mail : changkm@khnp.co.kr
현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 선임연구원



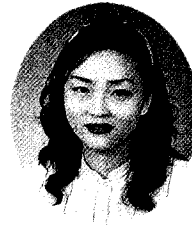
김창락

1982년 서울대학교 원자핵공학과 학사
1983년 미국 버클리대학교 핵공학과 석사
1987년 미국 버클리대학교 핵공학과 박사
Tel : 042-870-0373
E-mail : clkim@khnp.co.kr
현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 처분연구그룹장



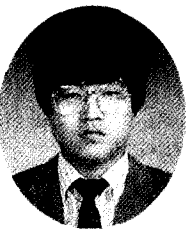
이은용

1978년 서울대학교 지질학과 학사
Tel : 042-870-0373
E-mail : eylee@khnp.co.kr
현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 처분연구그룹 책임연구원



박희영

1998년 부경대학교 응용지질학과 학사
2000년 부경대학교 응용지질학과 석사
Tel : 042-870-0373
E-mail : dodo214@hanmail.net
현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 연구원 위촉연구원



박주완

1981년 고려대학교 기계공학과 공학사
1992년 한국과학기술원 원자력공학과 공학석사
Tel : 042-870-0373
E-mail : p5j9w@khnp.co.kr
현재 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원 처분연구그룹 선임연구원