

순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법 고찰 Verification on the Fracture Size Estimation Using Forward Modeling Approach

김 경 수 (Kyung Soo Kim)
김 천 수 (Chun Soo Kim)
배 대 석 (Dae Seok Bae)
정 지 곤 (Ji Gon Jeong)

한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소
충남대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

단열의 기하학적 인자 중에서 단열크기는 지반공학적 및 수리지질학적으로 중요한 인자임에도 불구하고 측정과 분석단계에서 불확실성이 가장 크게 작용하는 요소이다. 본 연구는 단열크기 추정을 위한 연구동향을 소개하고, 최근 제시된 순산 모델링(forward modeling) 기법을 이용한 추정방법에 대하여 조사 단면적과 단열 단면적과의 차이에 따른 교차확률관계 및 단열조와 조사면이 이루는 방향에 따른 교차확률의 변화에 대하여 모사적 검증에 시도하였다. 검증 결과 순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법은 동굴 벽면이나 시추공, 노두면에서 단열조별로 교차되는 확률을 알고, 단열길이의 확률분포특성을 근사하게 추정할 수 있다면 실제 단열크기를 알아 낼 수 있는 방법으로 적용 가능하다고 인정된다.

The fracture size among geometric parameters of the fracture system is treated as one of the most important factors in the geotechnical and hydrogeological analysis. However, several uncertainties in data acquisition and analysis process about the fracture size are not clear yet. This study presents the current status on the estimation of the fracture size and verifies the estimating method using forward modeling approach. The factors considered are the variation of fracture intersection probabilities with different assumptions on the orientation of sampling planes and fracture size by using a simulated three dimensional fracture network model. If it is possible to analyze precisely the fracture intersection probabilities and the characteristics of probabilistic distribution from cavern walls, outcrops or boreholes, the actual fracture size developed in rock mass can be estimated confidently.

서 언

암반에 분포하는 단열(fracture)의 분포특성은 지하수유동해석과 사면안정성, 터널굴착 등 각종 지반공학적 설계에 예외없이 반영된다. 단열분포특성의 중요성은 첫째, 암반 내에서의 지하수유동특성, 둘째, 자연적 현상 또는 인위적 행위에 의한 암반의 역학적 안정성 등에 직접적인 영향을 미치기 때문인 것으로 집약될 수 있다. 특히 암반등급, 암피크기, 단열의 기하학적 또는 수리학적 연결성 등을 평가하기 위해서는 단열크기의 정확한 자료가 요구된다.

단열은 공간적으로 특정한 방향성과 함께 유한의 크기를 갖는다. 단열체계의 정성적 분류(Black et al., 1994)에 의할 경우, 그 확률적인 분포특성에 대하여 야외에서 충분히 조사가 가능한 것은 작은 규모에 해당되는 절리계이다. 본 논문에서는 작은 규모의 절리로부터 큰 규모의 단층에 이르기까지 암반에 발달된 모든 불연속면에 대하여 단열이라 칭하고자 한다. 우리가 현장에서 측정하는 절리규모의 단열의 크기에 대한 정보는 노두면, 터널벽면 또는 시추코아에 교차되는 단열길이로서 이것은 암반의 공간내에 임의 방향성을 갖는 단열면의 일부가 보여지는 것에 지나지 않는 것이다. 이러한 연유에서 단열의 기하학적 인자 중에서 단열크기는 측정과 분석단계에서 불확실성이 가장 크게 작용하는 요소이다.

본 연구는 단열크기 추정을 위한 그 간의 연구 동향을 소개하고, 최근 순산 모델링을 이용한 추정 방법을 설득력있게 제시한 La Pointe et al. (1993)의 방법에 대하여 모사적 검증을 시도하여 현장에서의 적용 가능성을 검토해 보고자 한다. 본 논문에서 단열길이라 함은 노두에 교차되어 나타나는 2차원적인 흔적길이(trace length)를 말하며, 단열반경(fracture radius)는 단열의 형상이 원형이라 가정할 때 단열과 동일한 면적을 갖는 원의 반경을 일컫는다.

연구 동향

암반에 분포하는 단열은 현재까지의 대상암반의

변형이력이 기록된 것으로서, 특히 이들의 기하학적 분포특성에 대한 연구는 암반의 역학적 안정성과 단열체계개념의 지하수유동 해석을 요구하는 사업과 함께 심도있게 수행되어 오고 있다.

먼저, 대규모의 단열대(단층대, 파쇄대)는 현상이나 도면 상에서 위치와 방향성, 규모 등의 기하학적 특성을 정확하게 추정할 수 있으나, 중·소규모의 단열들에 대하여는 확률분포함수로 밖에 표현할 방법이 없다는 점을 인정해야 한다. 단열길이를 측정하는 궁극적 목적이 단열크기의 분포를 유추하기 위한 것이지만, 이들 간의 분포관계에는 다음과 같은 오차가 중요하게 작용한다(Pahl, 1981 ; Priest & Hudson, 1981 ; Einstein & Baecher, 1983 ; Kulatilake & Wu, 1984 ; Rouleau & Gale, 1985).

- (1) 노두면에 나타나는 단열길이는 노두면과 단열간의 상대적 방향성에 좌우된다.
- (2) 단열이 노두에 나타날 수 있는 확률과 노두상의 축선(scanline)에 교차될 수 있는 확률은 크기가 큰 단열이 작은 것에 비하여 상대적으로 더 많다.
- (3) 측정대상 최소길이(cut-off length)보다 작은 단열에 대한 자료는 얻을 수 없다(truncation bias).
- (4) 노두 밖으로 연장되는 단열의 완전한 길이는 측정할 수 없다(censoring error).

3차원적 단열형상에 대한 모델 개발의 어려움 때문에 많은 연구자들(Crudon, 1977 ; Priest & Hudson, 1981 ; Pahl, 1981)은 2차원적 단열길이만을 대상으로 문제를 해결하고자 하였다. Warburton(1980)과 Priest & Hudson(1981)은 단열의 형상이 원형이고, 무작위적으로 분포할 때 축선상에 교차하는 단열직경의 분포를 계산할 수 있는 적분식을 만들었으나 상·하한 값에 제한을 받는다는 점과 단열의 크기가 클 수록 축선과의 교차확률이 더 커진다는 오차가 존재한다.

Priest & Hudson(1981)은 노두면의 크기가 한정적일 때, 축선을 기준으로 이에 교차하는 단열 양단으로의 길이 비율을 고려하여 단열의 일반적 확률분포유형을 제시하였으며, 반-단열길이(semi-trace length) 평균은 전체 평균 단열길이의 1/2이었다(Priest, 1993). 또한 이들은 노두면이 클 때, 측정의 편의를 위해서 축선의 한 쪽에 임의의 기준

선을 정하여 단열길이를 추정하는 적분식을 제시하였는데, 이 방법은 단열길이 또는 반-단열길이의 확률분포함수 형태를 알고 있을 때 적용 가능하다.

Pahl(1981)은 단열길이의 확률분포함수를 모르더라도 평균 단열길이를 추정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 censoring error가 발생하지 않는다는 조건에서만 가능하다는 것이 단점이다.

실제의 단열크기를 추정할 수 있는 방법으로서 임의의 확률분포함수로 대표되는 무작위 단열망을 발생시켜 이로부터 단열크기를 추정하는 방법이 연구되었다 (La Pointe, 1980 ; Long, 1983 ; Priest & Samaniego, 1983, 1988). 이 방법은 암반의 지하수 유동을 해석하기 위하여 단열의 기하학적 특성을 정량화하는 과정에서 연구의 계기가 되었으며, 최근에 이르러 La Pointe et al.(1993)에 의해 타당성이 제기되었다.

국내의 경우 단열크기에 대한 집중적인 연구는 없었고, 단열의 일반적인 기하학적 분포특성 등 현상학적 연구사례만 있을 뿐이다(노병돈, 1989 ; 김경수의, 1990 ; 강병무의, 1993 ; 김경수의, 1998).

순산 모델링 기법에 의한 단열크기의 추정방법

La Pointe et al.(1993)은 자연상태의 단열분포특성을 실제와 근사하도록 3차원적으로 모사가 가능하고, 모사된 단열망모델 내에서 시추공, 지하공동 등 임의의 추출(sampling)기법이 허용된다면 단열조와 임의 조사면(sampling plane)과의 교차확률을 이용하여 실제 단열크기를 추정할 수 있다고 하였다. Fig.1은 단열길이의 자료로부터 단열크기를 도출해 내기 위하여 순산 모델링(Dershowitz, 1992)이 어떻게 이용되는지를 보여준다. 단열반경은 전술한 바와 같이 단열과 동일한 면적을 갖는 원의 반경을 일컫는다. 이들이 제시한 방법을 순서적으로 간략히 소개하면 다음과 같다.

- (1) 현장에서 취한 단열길이 자료(Fig. 2a)에 대한 확률분포특성을 정확히 추정
- (2) 지질학적으로 가능한 범위내에서 추정된 확률분포함수의 평균값과 표준편차를 추정
- (3) FracMan 코드(Golder Asso., 1994)를 이용하

여 Monte Carlo 기법으로 단열망모델 구성

- (4) 현장에서의 조사면(공동벽면, 노두면, 시추공 등)과 동일한 기하학적 형태를 갖는 임의의 조사면을 단열망모델에 투영 (Fig. 2b)
- (5) 현장 조사면과 모사 조사면에서 취해진 단열의 교차확률에 대하여 Kolmogorov-Smirnov test나 Chi-Square test와 같은 표준적인 통계학적 방법(Cheeny, 1983)을 이용하여 비교

이러한 일련의 과정을 통한 단열의 교차확률에 대한 비교결과가 서로 유사하다면 단열크기에 대한 확률분포함수, 평균, 표준편차의 추정치가 실제 암반내 단열의 크기 및 빈도분포의 대표값이 될 수 있다는 것이다. 이 방법은 지하공동 뿐만 아니라 시추공 또는 노두에 대하여도 적용 가능하다고 제안되었다.

교차확률의 변화 요인

La Pointe et al.(1993)은 이 기법을 제안하면서 추계론적 3차원 단열망모델 내에서 지하공동, 시추공 또는 노두의 상대적인 방향과 크기가 다양해 질 수 있다는 점을 독립적으로 검토하지 않았다. 일례로 시추공과 단열조가 교차되는 방향에 따라 단열 빈도가 변하므로 교차확률 역시 임의의 조사면과 어떤 상관관계를 갖을 것으로 예상된다. 또한, 임의의 조사면의 면적과 단열 면적과의 상대적 차이에 따라서 교차확률 역시 변하게 될 것이므로 실제 이 기법의 적용에 앞서 단열조와 조사면과의 교차각과 상대적인 크기의 변화에 따른 상관관계에 대하여 독립적인 검증이 필요할 필요가 있다.

모사적 검증에 이용된 코드는 FracMan(Version 2.306)이고, 검증에 적용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 단열의 형상은 원형이고, 단열반경은 이와 동일한 면적을 갖는 원의 반경이다.
- (2) 단열크기의 확률분포함수는 대수정규(lognormal)분포, 방향성은 Fisher분포이다(Dershowitz & Einstein, 1988).
- (3) 단열체계의 개념모델은 BART(enhanced Baecher model) 모델이고, 이 개념모델을 구성하는 단열군은 3차원 공간에서 무작위적으

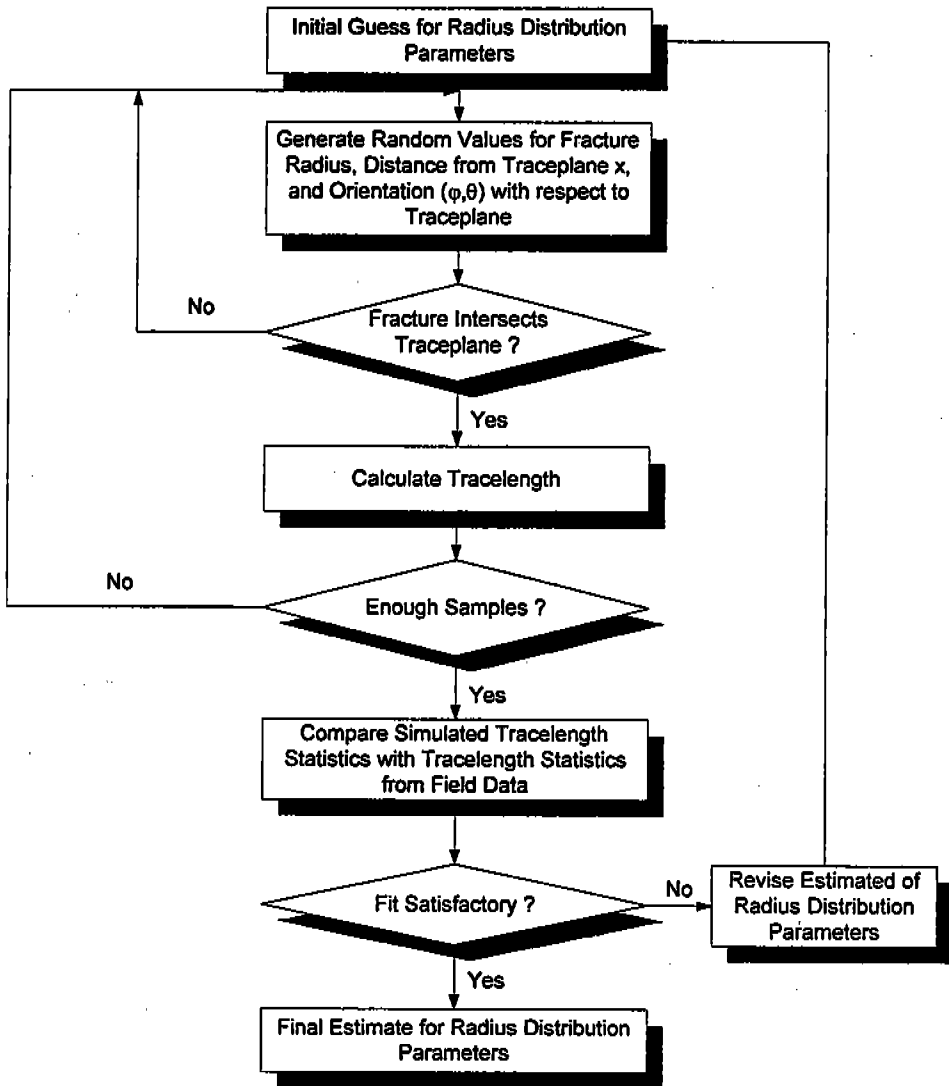


Fig. 1. Forward modeling to determine fracture size distribution. This algorithm produces good results when trace length data is not overly truncated (after La Pointe et al., 1993).

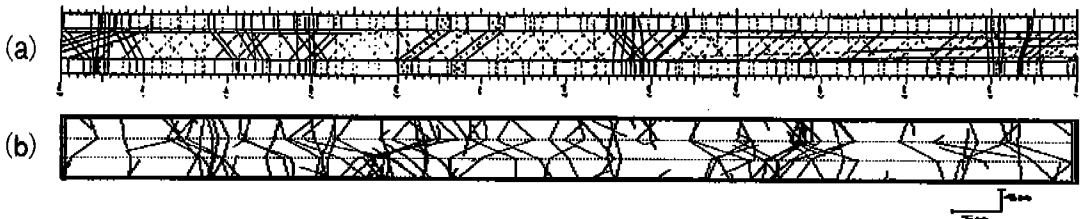


Fig. 2. Example of the fracture trace length from (a) in-situ underground cavern and (b) simulated underground cavern through three dimensional discrete fracture network modeling.

로 분포한다(Golder Assoc., 1994).

지하공동 단면적(A_c)과 단열 면적(A_f)과의 차이에 따른 교차확률관계 및 공동방향에 따른 교차확률의 변화를 검토하기 위하여 단열의 크기가 $A_c > A_f$, $A_c = A_f$, $A_c < A_f$ 인 경우에 남북방향의 수직인 단열조(800개 단열)에 대하여 수평인 공동의 trend가 $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지 30° 씩 상대적으로 증가하는 조

건으로 모사를 실행하였다(Table 1). 단열망모델에 투입된 공동의 양 벽면과 천정 각각을 하나의 조사면으로 간주할 때, 1개 조사면, 2개 조사면 및 3개 조사면을 교차하는 단열의 백분율은 12개의 평균과 표준편차에 대하여 각각 10회씩의 모사 평균값으로 계산되었다.

Table 1. Simulation parameters to test the variation of fracture intersection probabilities in a simulated cavern.

Modeling Region	100m x 100m x 100m		
Cavern	Dimension	7m(W) x 7m(H) x 100m(L)	
	Trend/Plunge	0/0, 30/0, 60/0, 90/0	
Fracture Orientation	PDF	Fisher Distribution	
	Dispersion	20.0	
	Pole Trend/Plunge	90/0	
Simulated Fracture Size	PDF	Lognormal Distribution	
	Mean (μ) \pm SD (σ)	2.0m \pm 1.0m	4.0m \pm 2.0m
Number of Fracture	800		

단열크기와 조사면의 상대적인 크기의 차이에 따른 관계, 그리고 단열조와 공동방향에 교차되는 각에 따라서 교차확률에 미치는 영향을 검토하였으며, 계산된 결과는 Fig. 3에 도시하였다. $A_c > A_f$ 이거나 $A_c = A_f$ 인 경우 조사면과의 교차확률은 1개 조사면 > 2개 조사면 > 3개 조사면의 순이 되며, 이때 3개 조사면과의 교차확률은 매우 희박하다. 다만, 단열과 공동의 교차각이 직각에 가까워질수록 2개 조사면에서의 교차확률이 증가한다. $A_c < A_f$ 인 조건일 때에는 단열과 공동의 교차각이 증가함에 따라 교차확률은 1개 조사면 > 2개 조사면 > 3개 조사면, 2개 조사면 > 1개 조사면 > 3개 조사면, 3개 조사면 > 1개 조사면 > 2개 조사면의 순으로 변한다. 만약에 A_f 가 훨씬 더 큰 경우에는 단열과 공동의 교차각이 직각일 때 3개 조사면 > 2개 조사면 > 1개 조사면의 순으로 될 것이다. 3개 조사면의 교차확률이 변하는 대칭점은 교차각이 $40^\circ \sim 50^\circ$ 인 영역에서 이루어진다.

이 분석을 통해서 알 수 있는 것은 단열크기와 조사면적의 상대적 크기의 차이에 관계없이 조사면의 방향과 평행한 단열조의 크기에 대하여는 정확

한 추정이 불가능하다는 것이다. $A_c > A_f$ 인 경우에는 단열조와 조사면의 교차각이 적어도 30° 이상 되어야 비교가 가능하다. $A_c = A_f$ 인 경우에는 1개 조사면과 2개 조사면의 교차확률이 조사면의 방향변화에 따라서 민감하지 않은 것으로 밝혀졌다. 위의 두 경우 교차각의 크고 작음에 관계없이 모두 3개 조사면의 교차확률은 0에 가깝기 때문에 예측결과에 대한 신뢰도는 다소 떨어질 수 밖에 없다. $A_c < A_f$ 인 경우에는 비교적 높은 신뢰도 수준으로 단열크기를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 이 경우에도 평행하게 교차하는 경우에는 3개 조사면과의 교차확률이 0에 가깝기 때문에 정확한 추정이 어려울 것으로 예상된다.

단열크기 추정방법의 검증

현장에서 단열조사를 만족스럽게 할 수 있으려면 노두, 절취면 또는 지하공동 등에 대한 접근성이 보장되어야 한다. 특수한 현장을 제외하고는 일반적으로 조사면의 면적이 평균적인 단열면적보다

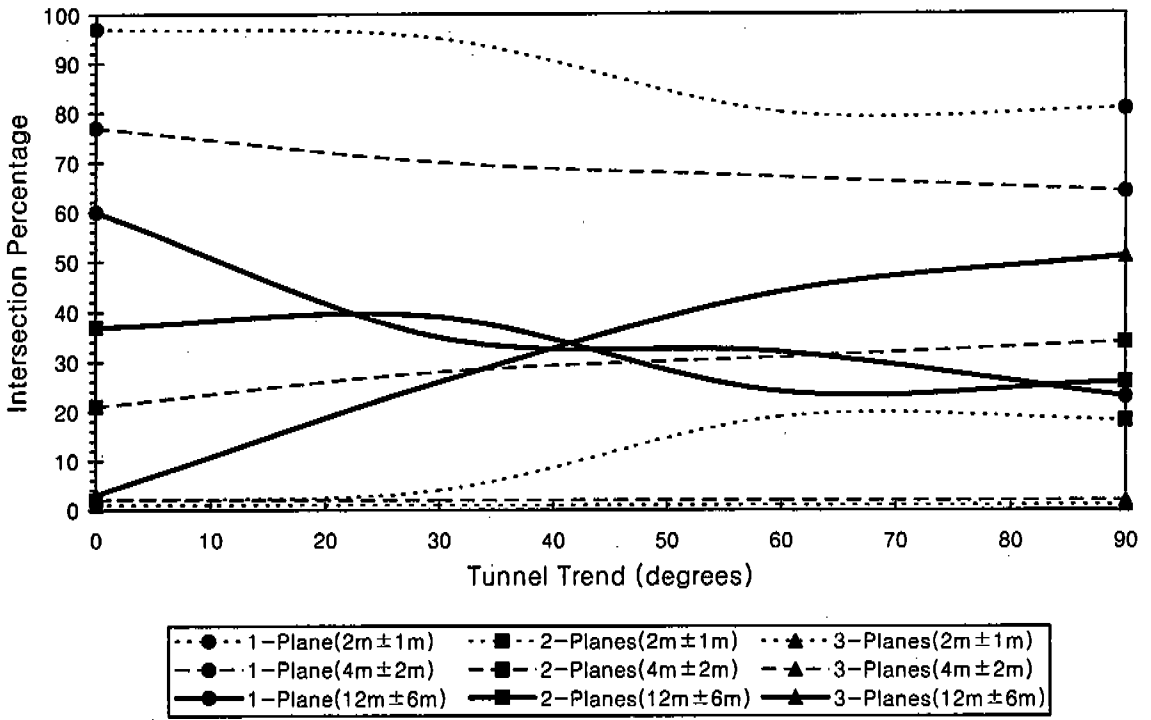


Fig. 3. Results of the simulated discrete fracture network modeling on different assumptions of the orientation of sampling plane, i.e., underground cavern, from a fracture set.

같거나 작다. 따라서 앞 절의 검토결과에 의거 단열면적이 조사면의 면적보다 클 경우($A_c < A_f$) 단열크기를 실제에 가깝게 추정 가능한지에 대하여 검증해보고자 한다.

검증조건은 단열의 크기가 공동의 단면적보다 클 경우에 남북방향의 수직인 단열조(1,500개 단열)에 대하여 수평인 공동의 trend가 $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지 30° 씩 상대적으로 증가하는 것으로 가정하였다(Table 2). 먼저, 검증에 필요한 기준 단열크기(simulated fracture size)로서 lognormal 분포이고 평균(μ)=8m, 표준편차(σ)=5m인 단열조를 공동과의 교차각($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)마다 각각 10회씩 모사하여 평균 교차확률을 정하였다. 즉, 남북방향의 수직인 단열조의 크기를 알고 있을 때 단열조와 조사면(공동벽면)과의 교차각에 따라 교차확률을 결정하는 것이다. 두 번째 단계로서, 앞서의 기준 단열크기를 모른다는 전제하에 $\mu=4m, 8m, 12m$ 이고 이들 각각에 대하여 $\sigma=2m, 4m, 6m, 10m$ 인 12개 조합의 추

정 단열크기(estimated fracture size)를 설정하였다. 세 번째 단계는 추정 단열크기의 각 조합별로 공동과의 교차각마다 각각 10회씩 모사하여 평균 교차확률을 계산하였다. 이와 같은 방법을 통하여 계산된 교차확률은 Fig. 4부터 7에 도시되었다.

모사된 기준 단열크기에 대하여 추정된 단열크기의 평균과 표준편차값이 동일하거나 근사한 교차확률을 나타내면 추정된 단열크기가 타당한 것으로 고려될 수 있다. 즉, 모사결과를 연결시키는 방법은 많이 있겠지만 주어진 하나의 평균에 대하여 1개 조사면, 2개 조사면, 3개 조사면별로 모든 점들을 연결시키는 방법이 가장 효과적이고, 이론적으로 이들 모든 곡선이 동일한 표준편차로서 교차할 경우 최적의 추정이라 할 수 있다.

단열조와 공동과의 교차각마다 모사된 기준 단열크기가 갖는 교차확률에 대하여 추정 단열크기의 평균과 표준편차값의 조합별로 교차확률을 살펴본다. 조사면으로 정한 공동의 단면적($12m^2$)에 비

순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법 고찰

Table 2. Simulation parameters to test the estimation accuracy of the fracture size while both sampling plane and estimated mean and standard deviations are different in a simulated cavern.

Modeling Region	100m x 100m x 100m			
Cavern	Dimension	4m(W) x 3m(H) x 100m(L)		
	Trend/Plunge	0/0, 30/0, 60/0, 90/0		
Fracture Orientation	PDF	Fisher Distribution		
	Dispersion	30.0		
	Pole Trend/Plunge	90/0		
Simulated Fracture Size	PDF	Lognormal Distribution		
	Mean(μ) \pm SD(σ)	8.0m \pm 5.0m		
Estimated Fracture Size	PDF	Lognormal Distribution		
		4.0m \pm 2.0m	8.0m \pm 2.0m	12.0m \pm 2.0m
		4.0m \pm 4.0m	8.0m \pm 4.0m	12.0m \pm 4.0m
		4.0m \pm 6.0m	8.0m \pm 6.0m	12.0m \pm 6.0m
		4.0m \pm 10.0m	8.0m \pm 10.0m	12.0m \pm 10.0m
Number of Fracture	1,500			

Table 3. Simulated results for the standard deviation with varying intersection angle between a fracture set and sampling plane.

Intersection Angle	Mean(μ), m	Standard Deviation(σ), m				
		1-Plane	2-Planes	3-Planes	Range	Mean
Parallel	4	5.1	5.3	4.6	0.7	5.0
	8	4.3	4.7	2.7	2.0	3.9
	12	-	-	-	-	-
30°	4	7.8	3.9	4.5	3.9	5.4
	8	5.0	4.8	4.9	0.2	4.9
	12	2.0	2.2	-	-	-
60°	4	3.5	5.0	4.7	1.5	4.4
	8	5.2	5.3	5.3	0.1	5.3
	12	-	7.5	-	-	-
Normal	4	-	4.8	7.8	-	-
	8	5.2	4.7	4.9	0.5	4.9
	12	4.4	3.0	4.0	1.4	3.8

하여 모사된 기준 단열조의 면적(201m²)이 매우 크므로 Fig. 1에서 검토한 바와 같이 단열과 공동의 교차각(즉, 단열조의 주향과 공동축이 이루는 각)이 증가함에 따라 모사된 기준 단열조의 교차확률은 1

개 조사면>2개 조사면>3개 조사면(Fig. 4), 2개 조사면>1개 조사면>3개 조사면(Fig. 5), 3개 조사면>1개 조사면>2개 조사면(Fig. 6), 3개 조사면>2개 조사면>1개 조사면(Fig. 7)의 순으로 계산된다. 기

준 단열조와 공동 벽면과의 교차각에 따른 추정 단열크기별 표준편차의 계산결과는 Table 3에 정리하였고, 이를 다시 도식화하면 Fig. 8과 같다. 먼저, $\mu=4\text{m}$ 인 경우 σ 의 범위는 교차각이 평행할 때 0.7m로부터 교차각이 30°일 때 3.9m까지 변화한다. 교차각이 수직일 때 1개 조사면에서의 교차확률은 추정 불가능하다. $\mu=8\text{m}$ 인 경우 σ 의 범위는 교차각이 평행할 때 최대 2.0m로부터 교차각이 60°일 때 최소 0.1m로 계산된다. $\mu=12\text{m}$ 인 경우에는 σ 의 범위는 교차각이 평행할 때 교차확률의 추정이 불가능한 것을 알 수 있다. 종합하면, 기준 단열크기에 대하여 추정 단열크기가 크거나 작은 경우 단열조와 조사면이 이루는 교차각에 따라 표준편차의

변화 폭이 큰 것으로 밝혀졌다. 즉, 기준 단열크기에 대하여 추정 단열크기의 차이가 클수록 실제 단열크기의 정확한 추정이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 예외로 기준 단열크기보다 작은 $\mu=4\text{m}$ 인 경우처럼 교차각이 평행할 때 기준 단열크기와 근사한 교차확률을 보일 수도 있기 때문에 실제 적용과정에서는 교차각을 고려하여야만 오류를 방지할 수 있을 것이다. 추정 단열크기가 기준 단열크기와 동일한 경우에는 교차각이 평행한 경우를 제외하고는 즉, 교차각이 약 30°이상일 때 근사한 값을 구해 낼 수 있으며, 정확도는 모사횟수와 비례한다.

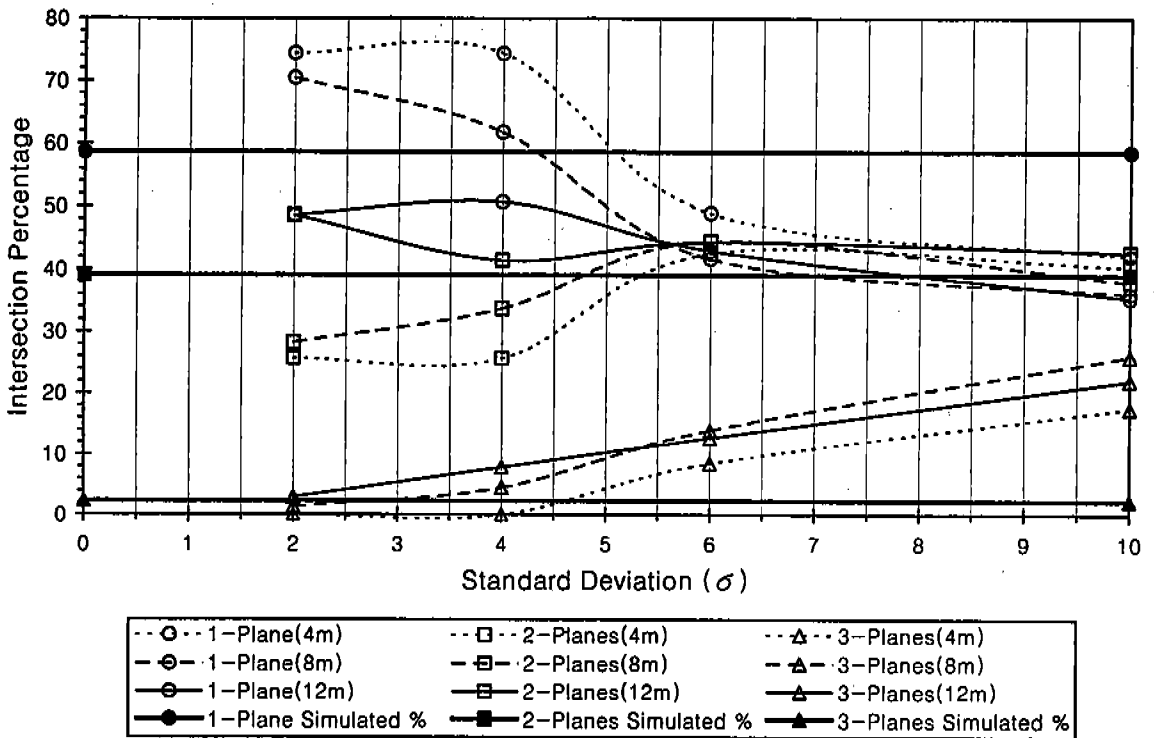


Fig. 4. Estimated results for the simulated fracture size. Sampling planes (i.e., underground cavern) and preferred orientation of a fracture set is parallel.

순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법 고찰

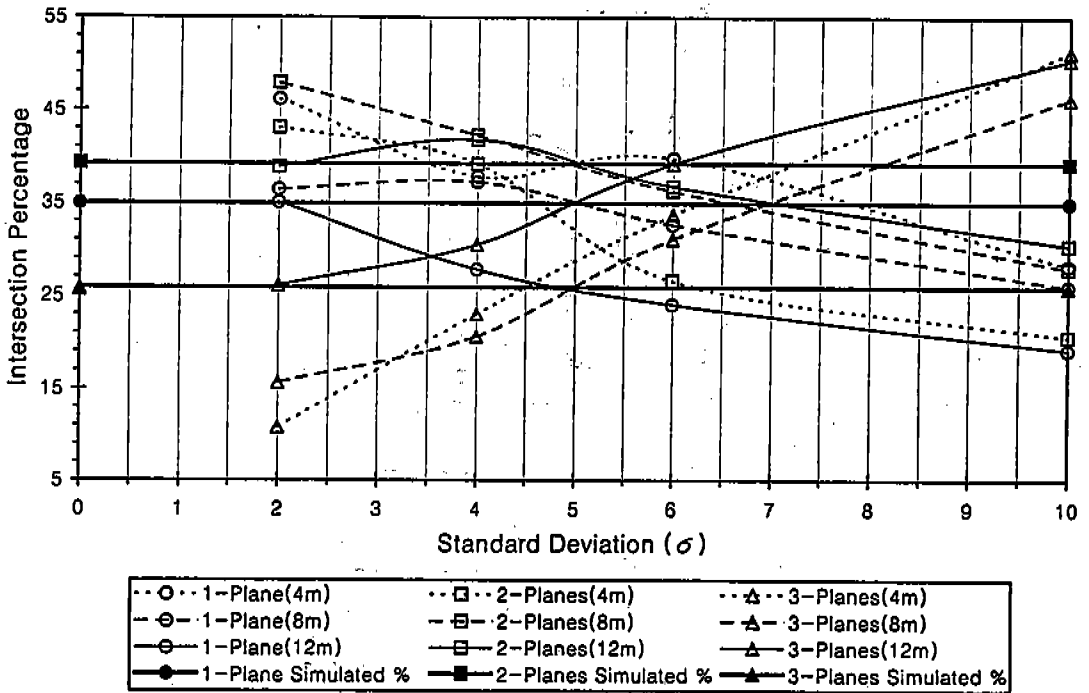


Fig. 5. Estimated results for the simulated fracture size. Intersection angle between sampling planes and preferred orientation of a fracture set is 30°.

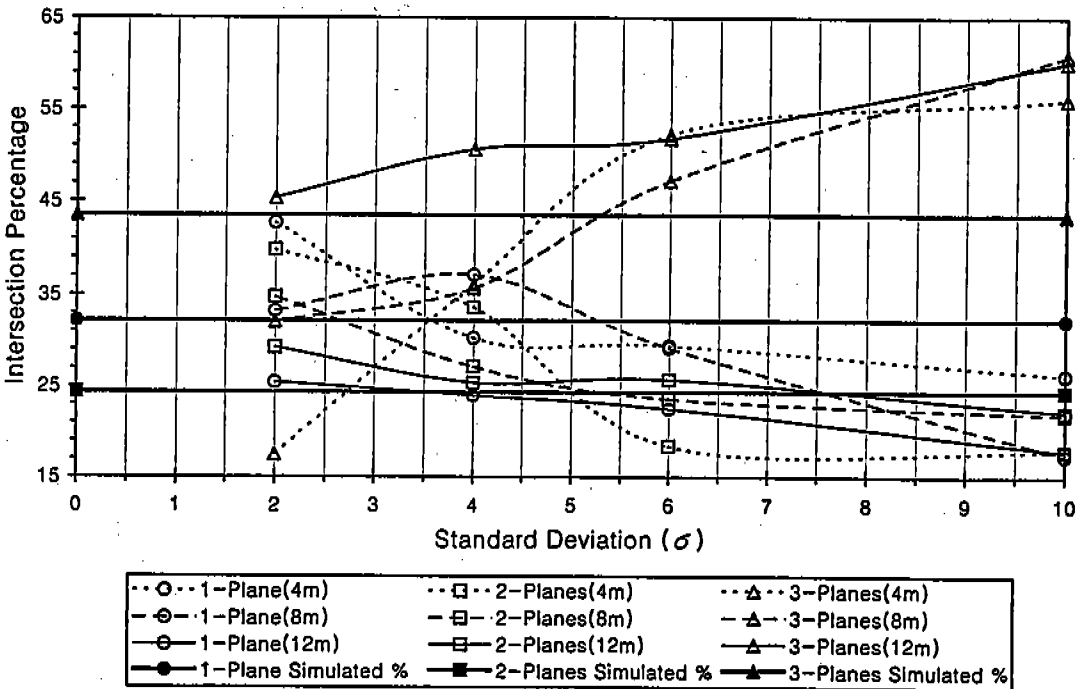


Fig. 6. Estimated results for the simulated fracture size. Intersection angle between sampling planes and preferred orientation of a fracture set is 60°.

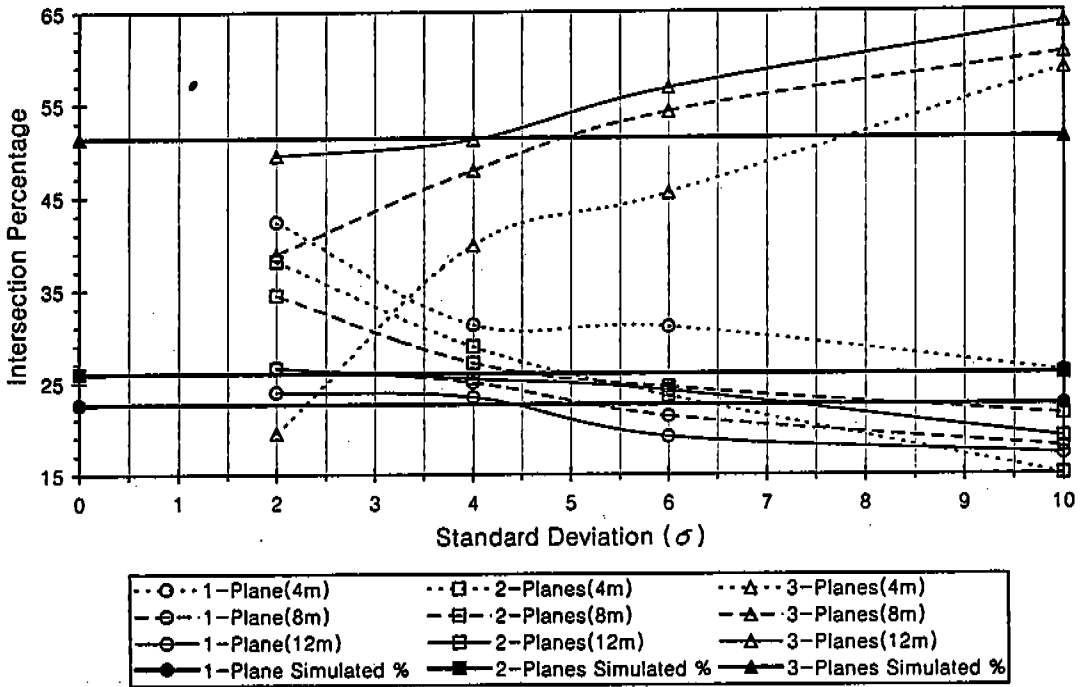


Fig. 7. Estimated results for the simulated fracture size. Intersection angle between sampling planes and preferred orientation of a fracture set is normal.

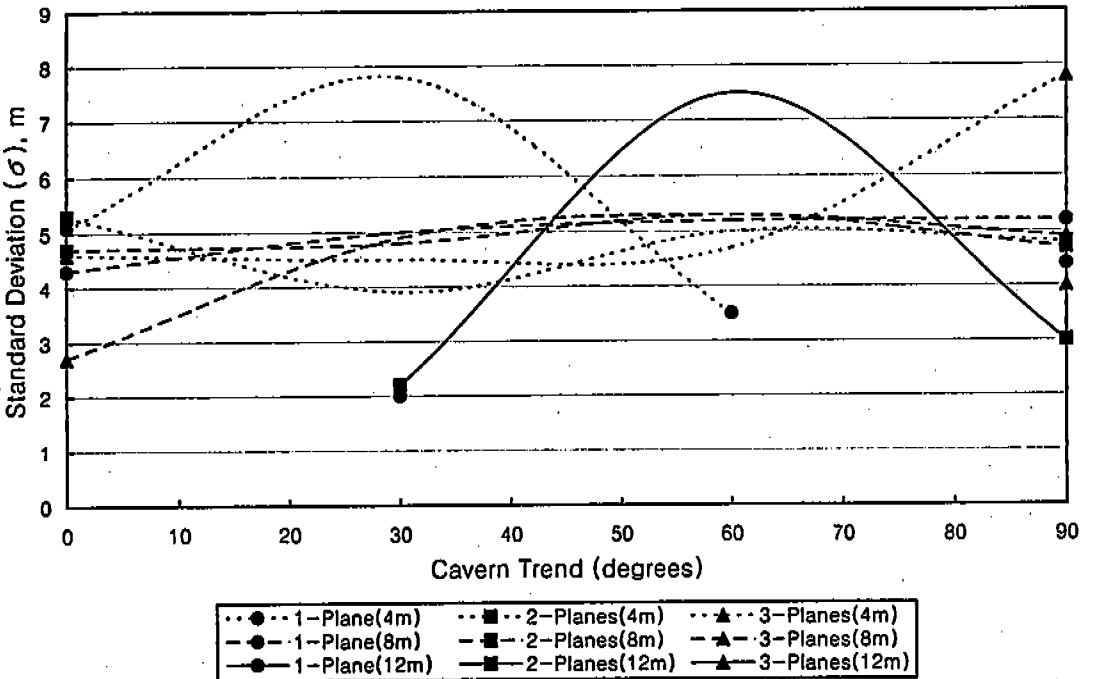


Fig. 8. Variations of the standard deviation with increasing the intersection angle between a fracture set and sampling plane.

토의 및 결론

순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법에 대하여 조사면의 면적과 단열 면적과의 차이에 따른 교차확률관계 및 조사면의 방향에 따른 교차확률의 변화를 검토하고, 가상적인 기준 단열크기에 대하여 실제 모사를 통한 검증을 시도해 보았다.

제안자는 공동벽면에서 각 단열조의 교차확률만을 알고 있을 때 다음과 같은 교차확률의 영역에 의해 실제 단열크기에 대한 직접적인 판단이 가능하다고 하였다.

- 제1영역 : 1개 조사면 > 2개 조사면 > 3개 조사면 (3개 조사면 → 0) = $Ac \gg Af$
- 제2영역 : 2개 조사면 > 1개 조사면 > 3개 조사면 = $Ac \geq Af$
- 제3영역 : 2개 조사면 > 3개 조사면 > 1개 조사면 = $Ac \leq Af$
- 제4영역 : 3개 조사면 > 2개 조사면 > 1개 조사면 (1개 조사면 → 0) = $Ac \ll Af$
- 제5영역 : 1개 조사면 & 2개 조사면 → 0, 3개 조사면 → 1.0 = $Ac \ll \ll Af$

그러나, 본 연구결과 이러한 영역에 의한 판단은 예외없이 확정적인 것일 수는 없고, 교차영역의 구분은 단열조와 조사면과의 교차각에 의해서, 그리고 단열의 면적과 조사면의 면적과의 상대적인 크기의 차이에 의해 좌우되는 것으로 밝혀졌다.

조사면의 면적과 단열 면적과의 차이에 따른 교차확률관계에 있어서 양자의 상대적 크기의 차이에 관계없이 조사면의 방향과 평행한 단열조의 크기에 대하여는 정확한 추정이 불가능하다. 대부분의 현장에서 조사가능한 조사면의 면적이 절리계의 면적보다 작기 때문에 조사면과 단열조가 약 30° 이상으로 교차할 경우 정확한 추정이 가능하다. 이러한 단열조와 조사면과의 교차각에 따른 측정오차를 줄이기 위해서는 가능한 한 3차원적으로 하나의 수평면과 두 개의 수직면을 이루는 별개의 조사면에서 단열조사가 이루어져야 하며 최종적으로는 이들을 종합하여 해석하여야 한다. 모사적 검증결과 순산 모델링 기법을 이용한 단열크기 추정방법은 지하공동 벽면이나 시추공, 노두면에서 단열조별로 교차

되는 확률을 알고, 단열길이의 확률분포특성을 근사하게 추정할 수 있다면 실제 단열크기를 알아 낼 수 있는 방법으로 적용 가능하다고 인정된다.

사 사

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력증장기 연구개발사업과 1997년도 교육부 학술조성연구비 (과제번호 : BSRI-97-5418)에 의하여 수행되었음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 강병무, 김천수, 배대석, 김경수, 기정석, 1993, 분리열극개념을 이용한 지하공동주변의 지하수유동 해석, 지질공학회지, 3, 125-148.
- 김경수, 장천중, 강병무, 정지곤, 1990, 경북 영일군 송라면에 분포한 화산암에 대한 불연속면 분포 특성, 지질학회지, 26, 1-15.
- 김경수, 김천수, 배대석, 김원영, 최영섭, 김종렬, 1998, 3차원 단열망모델링을 위한 단열수리인자 도출, 대한지하수환경학회지, 인쇄중.
- 노병돈, 1989, 상부 경상층군에 발달하는 분리면의 특성, 경북대학교 이학석사 논문.
- Black, J. W. et al., Review of SKB framework for the geoscientific characterization of sites for deep repositories with emphasis on the testing and numerical representation of fractured crystalline rock, PR44-94-001.
- Cheaney, R. F., 1983, Statistical methods in geology for field and lab decisions, George Allen and Unwin, 169p.
- Cruden, D. M., 1977, Describing the size of discontinuities, Int'l J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr., 14, 133-137.
- Dershowitz, W. S., 1992, Interpretation and synthesis of discrete fracture orientation, size, shape, spatial structure and hydrogeological data by forward modeling, Proceedings of Fractured and Jointed Rock Masses, Tahoe,

NV.

- Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H., 1988, Characterizing rock joint geometry with joint system models, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 21, 21-51.
- Einstein, H. H. and Baecher, G. B., 1983, Probabilistic and statistical methods in engineering geology, specific methods and examples, Part I: Exploration, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 16, 39-72.
- Golder Assoc. Inc., 1994, FracMan-Interactive discrete feature data analysis, geometric modeling and exploration simulation (Version 2.306).
- Kulatilake, P. H. S. W. and Wu, T. H., 1984, Estimation of mean trace length of discontinuities, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 17, 215-232.
- La Pointe, P. R. 1980, Analysis of the spatial variation in rock mass properties through geostatistics, *Proc. of the 21st U.S. Symp. on Rock Mechanics*.
- La Pointe, P. R., Wallmann, P. C. and Dershowitz, W. S., 1993, Stochastic estimation of fracture size from simulated sampling, *Proceedings of the 34th U.S. Symp. on Rock Mech.* Madison, WI.
- Long, J. C. S., 1983, Investigation of equivalent porous medium permeability in networks of discontinuous fractures, Ph.D. Thesis, Univ. of California, Berkeley.
- Pahl, P. J., 1981, Estimating the mean length of discontinuity traces, *Int'l J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 18, 221-228.
- Priest, S. D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman and Hall, 473p.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1981, Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, *Int'l J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 18, 183-197.
- Priest, S. D. and Samaniego, J. A., 1983, A model for the analysis of discontinuity characteristic in two dimensions, *Proceedings of 5th ISRM Cong.*, ISRM, Melbourne, F199-F207.
- Priest, S. D. and Samaniego, J. A., 1988, The statistical analysis of rigid block stability in jointed rock masses, *Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conf. on Geomech.*, The Inst. of Eng. Australia, Sidney, 398-403.
- Rouleau, A. and Gale, J. E., 1985, Statistical characterization of the fracture system in the Stripa granite, Sweden, *Int'l J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 22, 353-367.
- Warburton, P. M., 1980, Stereological interpretation of joint trace data: Influence of joint shape and implications for geological surveys, *Int'l J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 17, 305-316.

김경수, 김천수, 배대석
한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야
대전광역시 유성구 덕진동 150 (우 : 305-353)
TEL : (042) 868-2030, -2063
FAX : (042) 868-2063
Homepage : <http://www.kaeri.re.kr/~geoenv>
e-mail : nkskim1@nanum.kaeri.re.kr
nckskim1@nanum.kaeri.re.kr
ndsbae@nanum.kaeri.re.kr

정지곤
충남대학교 자연과학대학 지질학과
대전광역시 유성구 궁동 220 (우 : 305-764)
TEL : (042) 821-6424
FAX : (042) 822-9690