

그라우팅 설계를 위한 절리밀도분포 산출법 개발

Evaluation of fracture density distribution for the design of grouting works in fractured rocks

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

SYNOPSIS : To facilitate a drilling plan for grouting in fractured rock, an algorithm of practical use associated with a new term "fracture density distribution" or "fracture tomogram" is developed. It is well known that Televiwer data(amplitude and travelttime image) provide detailed information about not only dip and dip direction of each fracture but also its aperture size estimated by an appropriate evaluation algorithm. A selected plane section of medium around a borehole or the cross section between two boreholes is discretized into a two dimensional grid of cells(rectangular elements). As each elongated(straight) fracture passes through the cells, the corresponding aperture size value is successively summed up in each cell, depending on the fracture length segment. In this, the fracture lines can be determined by intersecting of each fracture plane with the selected plane section. If the fracture line does not pass through a particular grid element, the segment length is set to zero. The final value(aperture size value of each cell) derived from all the detected fractures constitutes the fracture density distribution of the selected plane section. Field examples are illustrated, which will prove the benefit of the suggested algorithm for several kinds of grouting works.

Key words : fracture density distribution, fracture tomogram, Televiwer data, design of grouting works, aperture size

1. 서 론

절리 암반내의 그라우팅 효과는 절리를 특수고결재료(예: cement, chemicals)로 채움으로써 용질(지하수, 방사능, contaminants 등)의 유동을 차폐함과 동시에 절리로 인해 약화된 전단강도(shear strength)를 크게 높이는 데 있다고 볼 수 있다. 그림 1은 산중턱 깎여지는 도로변에 위치한 실험시추공 TD, TC, TU에 그라우팅을 위한 시추공들이 등간격으로 분포된 하나의 획일적인 배열상태를 나타내고 있다. 일반적으로, 이러한 그라우팅 시추공 배열은 어디까지나 그라우팅 영역의 절리구조가 거의 유사할 경우 그의 타당성을 찾을 수 있다고 할 수 있다. 따라서, 그라우팅 설계는 무엇보다 그라우팅 영역 절리구조 내지 절리 특성에 대한 충분한 정보를 바탕으로 이루어짐이 바람직하다고 하겠다. 여기서 절리특성은 여러 요인들 즉, 절리틈새(aperture size), 절리 연속성(persistency) 및 주위 절리와의 연결성(connectivity), 절리 충전물질(infilling material), 절리 조도(roughness)등에 의해 달라지게 된다. 그러나, 자연상태로부터 상기 특성에 따른 정보를 제대로 얻는다는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 예를 들면, 비록 텔레뷰어기법에 의해 시추공 공벽을 고분해능으로 스캐닝하여 각 절리의 틈새가 정확하게 산출되었다고 하더라도 그 틈새가 절리 연장면 측면에서 일정하다고는 할 수 없다. 따라서, 지하수 유동에 대한 연구과

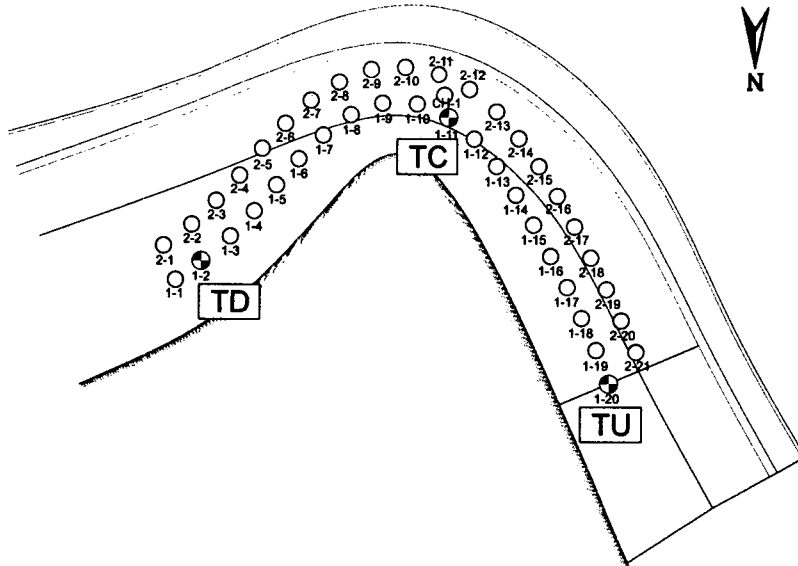


그림 1. 실험시추공(TD, TC, TU)과 그 주위 배열된 그라우팅 시추공(약 2m 간격)의 위치를 나타내고 있다. 각 실험시추공은 코어드릴(NX규격)에 의해 천공되었으며 여기에 텔레뷰어 탐사가 수행되었다.

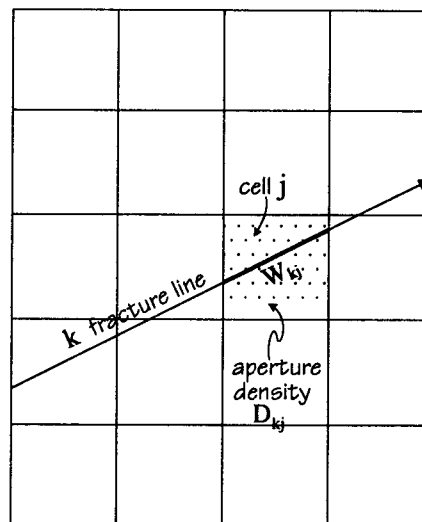


그림 2. 일정 틈새를 갖는 임의의 절리선(k fracture line)이 분할된 격자를 통과할 경우 각 격자의 틈새밀도(aperture density D_{kj})는 그 격자와 절리선이 교차하는 길이(W_{kj})에 비례한다. 여기서 k 절리선이 통과하지 않는 격자는 W_{kj} 를 0으로 두었다.

정에는 현 기술수준에 비추어 우선 상기 절리특성에 대한 불충분한 정보로 인하여 상당한 불확실성이 내재되고 있는 실정이다. 그러나, 그라우팅은 고결매질을 지하수 유동속도보다 훨씬 빠르게 강제로 투입하는 공정이며 또한 그라우팅 작업이 좁은 간격에서 반복되기 때문에 절리틈새, 절리 연결성 및 절리의 방향성이 다른 절리특성보다 그라우팅 결과에 대해 상대적으로 큰 역할을 할 것이 기대된다. 즉, 절리틈새가 크면 클수록, 절리의 교차가 빈번할수록 그라우팅의 필요성은 그만큼 높아진다는 것이다. 따라서, 본 논문은 상기 세 개의 절리특성을 바탕으로 실험시추공 주위 임의의 단면에 대한 절리밀도분포를 산출하는 내용을 담고 있다. 여기에는 절리면이 평면이며 또한 그의 틈새가 일정하다고 가정하였다. 한편, 절리틈새는 텔레뷰어 이미지로부터 프로그램 “OpenFrac”(김중열 외 1999)에 의해 산출되었으며 각 절리면이 임의의 단면과 교차하는 직선은 프로그램 “FracM”(김중열 외, 1998; 김중열, 2000)에 의해 계산되었다. 다음은 임의의 단면에 대한 절리밀도 분포를 산출하는 근본원리를 서술하고 있다.

2. 절리틈새 밀도분포 산출법의 근본원리

그림 2는 임의 단면을 격자(grid element, cell)로 분할(총 M, N 개)한 후 일정틈새를 갖는 절리가 투과할 경우(k fracture line) 각 격자가 틈새밀도(aperture density)로 특정 지워지고 있음을 예시하고 있다. 이때, 각 격자에 부가되는 틈새 값은 각 격자를 절단하는 절리선의 길이에 비례한다. 즉, 임의의 k 절리선에 대해 틈새밀도 D_{kj} 는

$$D_{kj} = W_{kj} A_k, \\ j = 1, 2, \dots, I \quad I = M \times N$$

로 표현된다. 여기서, W_{kj} 는 k 절리선이 격자 j 와 교차하는 길이이며, A_k 는 k 절리에 대한 틈새값이다. 각 격자에서 모든 k 절리선을 배려한 최종 틈새밀도 D_j 는 다음과 같다.

$$D_j = \sum_k D_{kj} \quad (1)$$

그림 3은 하나의 보기로서 4개의 격자($D_1 \sim D_4$)에 대해 3개의 서로 다른 틈새값($A_1 \sim A_3$)을 갖는 절리선이 통과하는 과정을 나타내고 있다. 이때 각 격자의 최종 틈새값은 식(1)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$D_1 = (1/\sqrt{2}) \cdot 0.03 + (1/\sqrt{2}) \cdot 0.12 + 0 \cdot 0.08 = 0.106m \\ D_2 = (1/\sqrt{2}) \cdot 0.03 + 0 \cdot 0.012 + 0 \cdot 0.08 = 0.021m \\ D_3 = (1/\sqrt{2}) \cdot 0.03 + (1/\sqrt{2}) \cdot 0.12 + 1 \cdot 0.08 = 0.186m \\ D_4 = 0 \cdot 0.03 + (1/\sqrt{2}) \cdot 0.12 + 1 \cdot 0.08 = 0.165m$$

그림 4는 상기 절리(틈새)밀도분포를 도면화하여 나타내고 있다. 이러한 산출과정이 실제 현장에 응용된다면 다음과 같은 경우가 기대된다. 즉, 만약 시추공 심도가 약 40m이고 시추공 주위 단면의 수평거리가 약 16m에 달하고 있다면 기본 격자 규격이 1m×1m일 경우, 도합 40×16=640개의 격자($I=640$)가 형성된다. 한편, 국내 절리암반내의 절리발달 상태를 고려한다면 상기 심도구간내의 열린절리는 대체로 50개를 상회하고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 최소한 50개 절리선($k=50$)에 대한 각 격자(도합 460개)의 최종 틈새밀도가 계산되는 것이다. 다음은 실제 현장응용사례를 보여주고 있다.

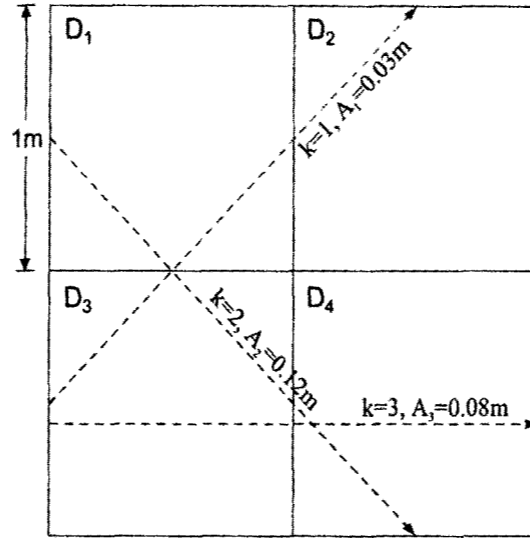


그림3. 절리틈새 밀도분포산출을 위한 알고리즘이 단순한 모형을 대상(네개의 격자와 세 개의 절리선)으로 예시되고 있다. 여기서 A1~A3는 각 절리에 대한 틈새값을 나타내고 있다.

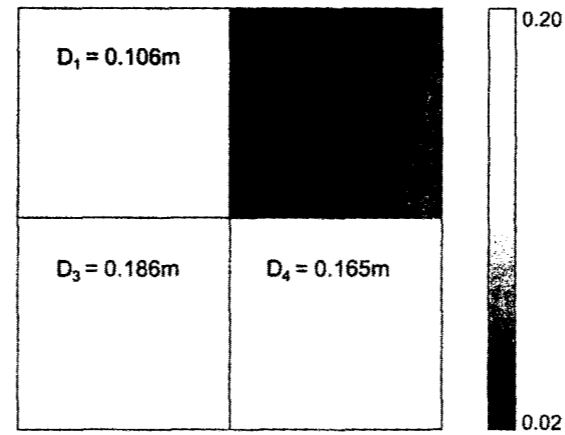


그림 4. 단순한 모형(그림 3참조)을 대상으로 산출된 절리틈새 밀도 분포.

3. 현장실험

그림 1에 나타난 세 개의 실험시추공(TD, TC, TU)에는 텔레뷰어 탐사가 수행되었다. 그로부터 각 열린절리에 대한 방향성(경사방향 및 경사각)과 틈새가 산출되었으며 나아가서 프로그램 “FracM”에 의해 시추공 TD와 TC 사이의 단면 및 시추공 TC와 TU 사이의 단면에 대한 절리선(k fracture line)이 계산되었다. 그림 5는 상기자료를 이용하여 절리틈새 밀도분포를 산출한 결과를 나타내고 있다. 여기서 기본 격자 간격은 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 이며 총 격자수는 640개에 달하고 있다. (a)는 단지 시추공 TD의 절리정보를 바탕으로, (c)는 단지 시추공 TC의 절리정보를 바탕으로 산출된 절리 밀도분포를 나타내고 있으며, (b)는 두 개의 시추공 절리정보를 동시에 사용하여 얻어진 결과를 보여주고 있다. 즉, (a)와 (c)의 결과를 합하면 (b)의 결과가 된다. 특히 (b)에는 이해를 돕기 위해 각 시추공의 단위 심도구간(1m)별 틈새값을 절리 밀도분포의 좌·우측에 대별하였다. 일별하여, 절리틈새밀도가 어느 위치에서 어느 방향으로 밀집되고 있는가가 상대적으로 훌륭하게 표현되고 있음을 볼 수 있다. 이전과 동일한 방법으로 그림 6에는 시추공 TC와 TU사이 단면에 대한 절리틈새 밀도분포를 나타내고 있다. 그림 7은 비교효과를 위해 시추공 TD-TC-TU에 이르는 분포를 상호 대조하여 나타내고 있다. 그림 1에 나타난 시추공의 위치에 따르면 TD-TC단면과 TC-TU단면은 거의 직각을 이루고 있기 때문에 그만큼 절리틈새 밀도분포가 시추공 TC를 경계로 단절된 양상을 보여주고 있다. 특히, 시추공 TD의 심도 약 27m에서 하부로 경사진 틈새 밀도분포가 상대적으로 높은 값을 보여주고 있다. 전체적으로 이러한 분포는 무엇보다 그라우팅이 중점적으로 이루어져야 할 위치를 제시하는 것이 되며, 때에 따라서는 방향성을 띤 그라우팅 공법(Fujisawa et al. 1996)의 필요성도 제기할 수 있는 것이다. 한편, 상기 절리틈새 밀도분포가 그라우팅을 위한 주요 자료가 된다면 역으로 이러한 결과는 바로 지하수 유동의 주요 통로를 대변하는 것이 되겠다.

4. 결 론

암반내 그라우팅의 효율성은 무엇보다 그라우팅 영역의 절리구조를 정확하게 파악하는데 있음은 주지의 사실이다. 그러나, 지금까지 이에 대처할 수 있는 적절한 기법이 제시되지 않았기 때문에 대부분의 경우 경험에 의한 확실적인 그라우팅 설계가 이루어졌다고 볼 수 있다. 최근, 텔레뷰어에 의해 측정되는 절리자료(방향성, 열린 상태, reflectivity 등)가 고분해능으로 수치화됨으로써 절리구조파악을 위한 다양한 전산화 알고리즘이 개발될 수 있게 되었다. 즉, 절리틈새를 자동으로 산출할 수 있는 프로그램 “OpenFrac”, 절리단면영상(fracture face mapping)을 가능하게 하는 프로그램 “FracM”이 개발되어 보급되고 있으며 나아가서 본 논문에서 제시한 절리틈새 밀도산출법은 바로 상기 기법의 전산결과를 바탕으로 개발된 하나의 새로운 전산처리기법이다. 본 논문에서 소개한 그의 현장 실험결과는 바로 상기 절리틈새 산출법이 그라우팅 설계를 위한 귀중한 기본 자료를 제시할 수 있음을 입증하는 것이 되며 또한 그에 따른 다양한 알고리즘 개발은 향후, 수리문제 및 환경문제에도 크게 기여할 것으로 본다.

5. 참 고 문 헌

1. 김중열(1998), “건설 기술자를 위한 지반조사 및 시험기술-텔레뷰어 탐사-”, 한국암반공학회, 한국 지구물리탐사학회, 한국자원연구소.
2. 김중열, 김유성, 현혜자(1999), “단열 투수성 인자의 정량화를 위한 단열틈 측정 및 분석기술 개발”, 한국자원연구소, 한국원자력연구소.
3. 김중열(2000), “텔레뷰어 탐사의 원리 및 지반공학 분야에서의 실제적용”, 새로운 지반조사 및 평가, 분석기술 국제 심포지움 논문집, 한국건설기술연구원, pp. 191-254.
4. T. Fujisawa, A. Nakamura, Y. Yamaguchi, and T. Matsui(1996), “Development of fracture direction controlled grouting”, *Grouting and Deep Mixing*, Rotterdam, pp. 689-694.

TD-TC : Before grouting

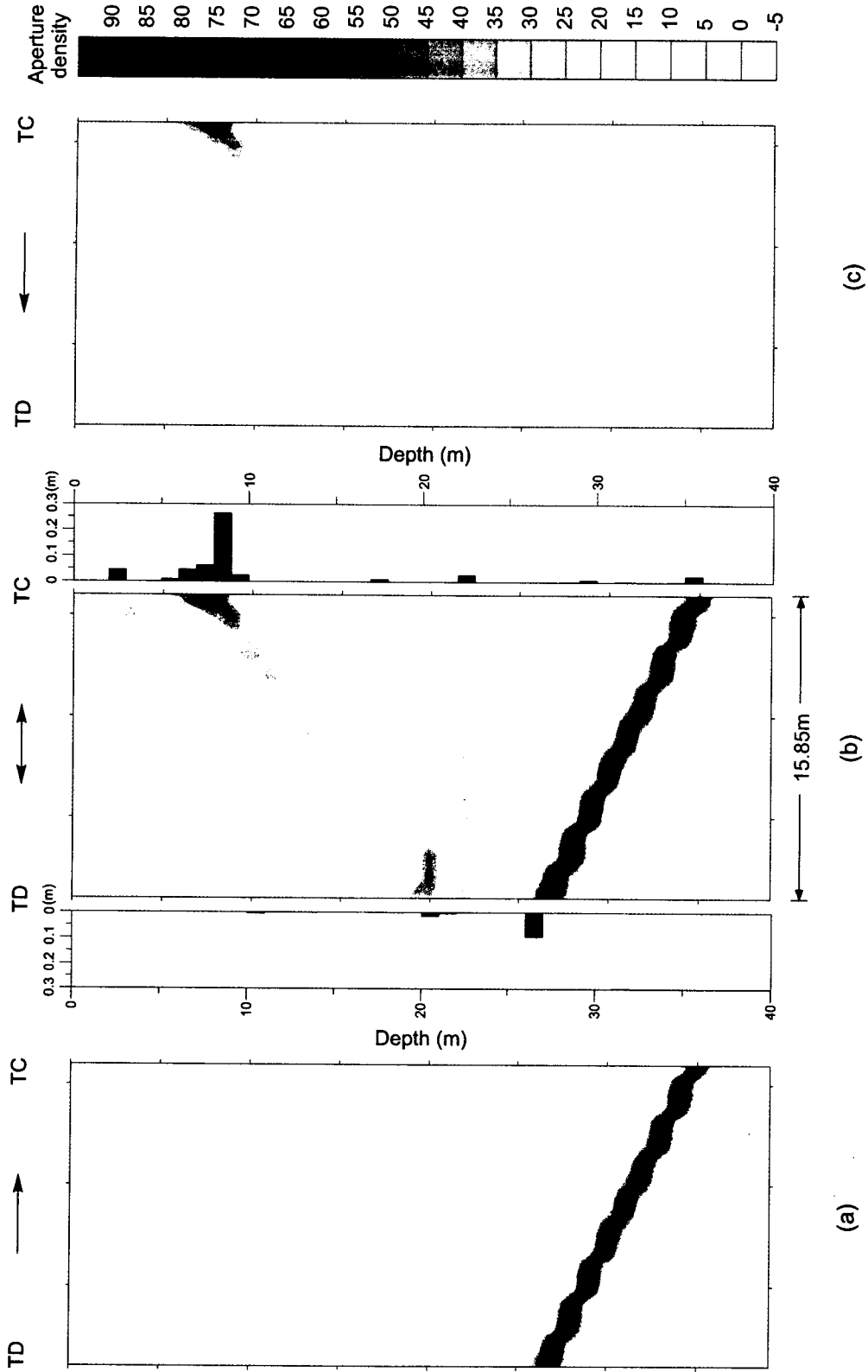


그림 5. 시추공 TD, TC를 포함하는 수직 단면의 절리틈새 밀도 분포.
 (a) 단지 시추공 TD의 절리 자료에 의한 결과, (b) 두개의 시추공 TD, TC의 절리 자료에 의한 결과, (c) 단지 시추공 TC의 절리 자료에 의한 결과.

TC-TU : Before grouting

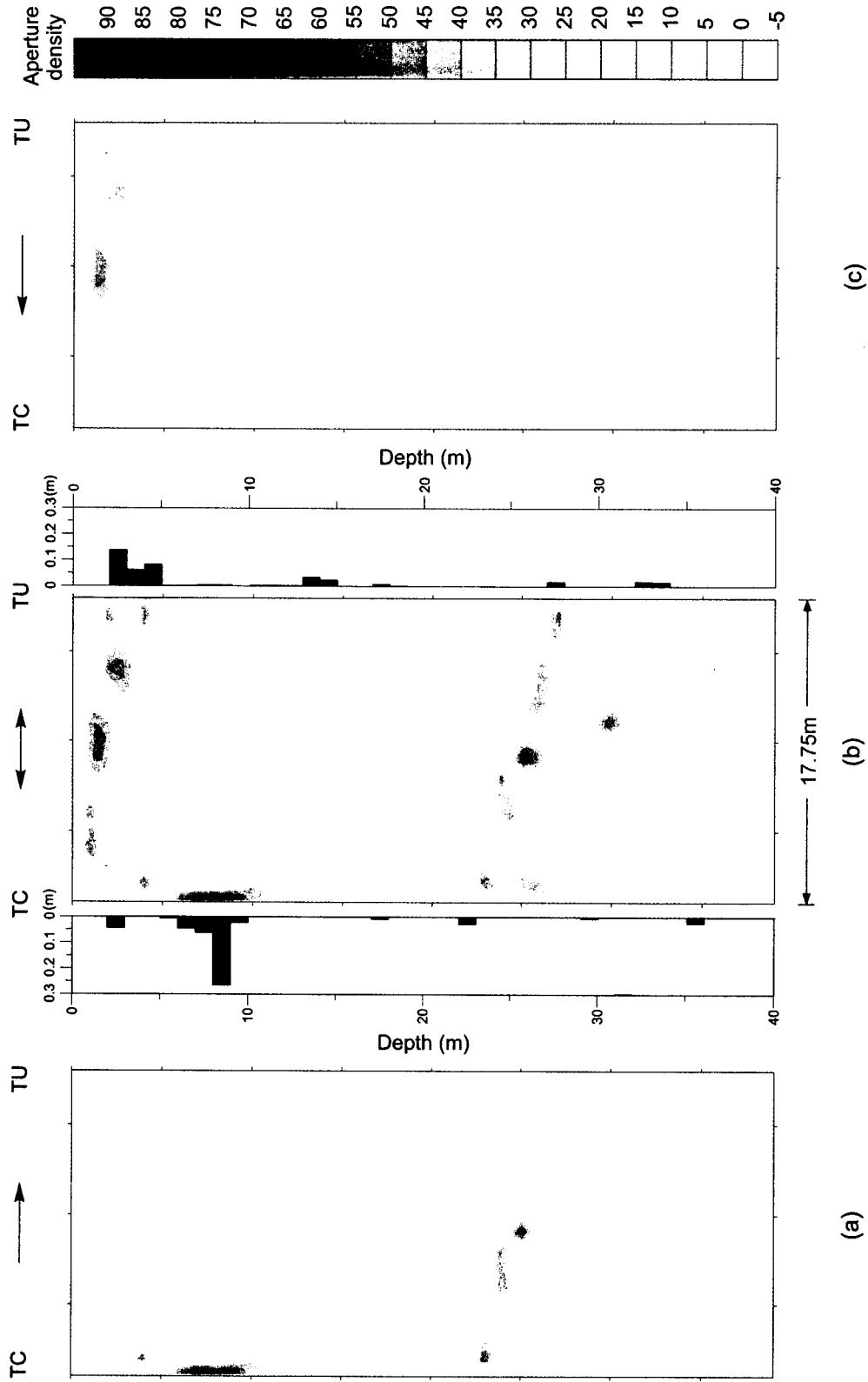


그림 6. 시추공 TC, TU를 포함하는 수직 단면의 절리틈새 밀도분포.
 (a) 단지 시추공 TC의 절리 자료에 의한 결과, (b) 두개의 시추공 TC, TU의 절리 자료에 의한 결과, (c) 단지 시추공 TU의 절리 자료에 의한 결과.

TD-TC-TU : Before grouting

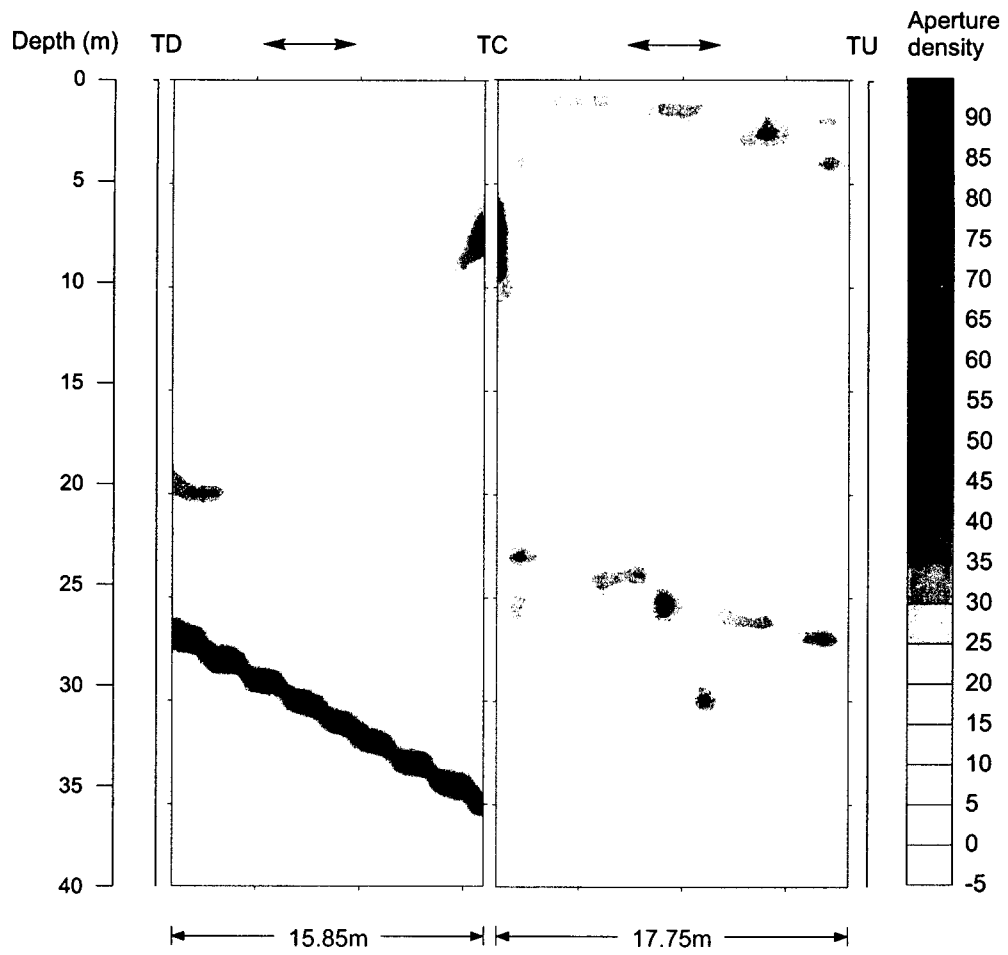


그림 7. 시추공 TD에서 TU에 이르는 수직 단면에 의한 절리 틈새 밀도 분포.