

## 절리암반내 그라우팅 성과에 대한 정량적인 판단기법 개발

### Accurate quantitative assessment of grouting efficiency in fractured rocks by evaluating the aperture sizes of fractures

김중열<sup>1)</sup>, Jung-Yul Kim, 김유성<sup>1)</sup>, Yoo-Sung Kim, 김형수<sup>2)</sup>, Hyong-Soo Kim  
백건하<sup>3)</sup>, Keon-Ha Back, 김기석<sup>4)</sup>, Ki-Seog Kim

- 1) 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources
- 2) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation
- 3) 한국수자원공사 수자원연구소 연구원, Researcher, Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation.
- 4) (주) 희송지오테크, Hee Song GeoTek Co., LTD.

**SYNOPSIS** : Groundwater flow is primarily influenced by the presence of fractures, functioning as conduits. To block the flow, grouting operation is commonly used. Thereby the fractures are then expected to be sealed, which will add to enhance the shear strength in rock. This far, regarding the assessment of grouting efficiency, however, there's been a considerable uncertainty. That is, several geophysical methods of high resolution such as tomography, S-wave logging have produced a significant amount of measurable response caused by grouting, but they can inevitably be used only for the qualitative assessment. Thus, this paper deals with an accurate quantitative assessment about the grouting result. In this, a new strategy is introduced, based mainly on evaluating the opening of fractures. For fracture-opening investigation purposes, borehole Televiwer has already proven to be an excellent logging technique that produces both amplitude image and travelttime image. As well known, the travelttime image can be converted to a high precision 3D caliper log with max. 288 arms, which allows to observe the opening of fractures. To evaluate the fracture opening from the travelttime image, an algorithm of practical use was developed, in which image correction due to the borehole deviation, feature discrimination of wall roughness from fractures, automatic evaluation procedure etc. were considered. Field examples are shown to confirm the efficiency of the suggested method.

**Key words** : quantitative assessment, grouting efficiency, borehole Televiwer, aperture size, automatic evaluation procedure

## 1. 서 론

암반내에 형성된 절리(fracture)는 지하수(혹은 방사능)유동의 주요 통로가 되고 있으며 또한 암반의 전단강도를 크게 떨어뜨리는 요인이 되고 있다. 예를 들면, 사면을 설계할 경우 무엇보다 절리와 관련한

여러 가지 정보(예: 경사방향, 경사각, 절리틈새, 절리수 등)와 지하수 상태 등은 주요 매개변수가 되며 역시, 댐이나 방사능 폐기물 저장시설도 제 기능을 발휘하기 위해서는 우선 그 주위 암반내 절리구조에 대한 적당한 대처가 요구된다. 그라우팅은 바로 이러한 경우 특수고결재료(예: chemicals, cement, polyurethane)로 절리를 채움으로써 지하수 흐름을 차폐함과 동시에 암반의 전단강도도 크게 높일 수 있는 보강공법으로 지금까지 널리 사용되고 있다. 그런데, 정작 그라우팅 결과를 검증하는 데에는 아직까지 이렇다할 판단기준이 제시되지 않고 있는 실정이다. 최근, Hane and saito(1996)는 시추공사이 단면에 대한 S파 토모그램(탄성과 속도 분포)을 그라우팅 전·후에 영상화함으로써 그로부터 관찰되는 물성변화를 그라우팅 성과에 대한 하나의 판단기준으로 연계하고자 하였다. 그러나, 토모그램 작성을 위해 필요로 하는 S파 도달주시에 대한 판단에는 우선 주어진 조사대상에 따라 흔히 상당한 오류가 발생할 수 있으며 더구나 토모그램 그 자체로는 그라우팅 효과에 대한 정성적인 판단기준은 될 수 있겠으나 그의 정량화를 위한 자료로는 상당부분 미흡하다고 할 수 있다. 한편, 그라우팅 매질, 지하수 및 주위암석의 전기 비저항치는 대부분의 경우 서로 다른 값을 보여주고 있기 때문에, 만약 절리내 지하수가 그라우팅 매질로 충전된다면 암반내 비저항치 분포는 이전의 것과 비교하여 크게 달라질 것이 기대된다. 현장실험에서 이러한 현상은 시추공사이 비저항 토모그램을 통하여 확인된 바 있으나(예: Imamura et al., 1996) 역시 그의 정량화를 위한 판단기준 마련에는 상당한 어려움이 수반된다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문은 텔레뷰어(김중열 외, 1995; 김중열, 2000)의 고분해능 공경검층기능을 이용하여 시추공 주위 그라우팅 효과의 정량화를 위한 하나의 새로운 판단 기법을 제시하는 데 주안점을 두고 있다. 그림 1은 그라우팅 전·후의 절리암반 상태를 예시하고 있다. 여기서, 그라우팅 이전 실험시추공에서 관찰되는 열린 절리는, 만약 그곳이 그라우팅 매질에 의해 채워진다면, 닫힌 상태로 보여질 것이 기대된다. 따라서, 그라우팅 성과에 대한 정성적 및 정량적인 판단을 위해서는 무엇보다 시추공 공벽상태(공경, 공벽 암반물성)를 정확하게 파악하는 것이 하나의 직접적인 접근방법이 되는 것이다. 텔레뷰어는 바로 이러한 목적에 부응할 수 있는 최적의 정밀 물리검층법이라 할 수 있다.

다음은 상기 텔레뷰어 측정데이터가 갖는 유용한 특성을 바탕으로 우선 그라우팅 성과의 정량화를 위한 하나의 바람직한 알고리즘을 소개하고 나아가서 그의 효율성을 국내 현장실험을 통하여 서술하고 있다.

## 2. 현장실험

그림 2는 산중턱(울산근교) 적어지는 소폭의 비포장 도로변에서 선정된 세 개의 실험시추공(TD, TC, TU)위치를 나타내고 있다. 도로 하부 및 사면은 암반(경암수준)이 노출된 상태에서 거의 절벽을 이루고 있으며 그 벽면에는 퇴적층의 발달상태가 잘 드러나고 있다. 특히, 시추공 TC 주위에는 거의 수직에 가까운 큰 절리(단층수준)가 육안으로 쉽게 관찰되고 있다. 각 실험 시추공(NX규격, core drill)의 심도는 약 40m에 달하고 있으며 그들 간의 수평거리는 각각 약 16m(TC↔TD) 및 18m(TC↔TU)이다. 그림에는 그라우팅 시추공 위치가 실험시추공을 따라 배열되고 있음을 보여주고 있으며 여기서 텔레뷰어탐사는 실험시추공을 대상으로 그라우팅 전·후에 수행되었다.

그림 3은 시추공 TD를 대상으로 그라우팅 전·후에 얻어진 텔레뷰어 진폭이미지 및 3차원 공경검층결과(3D caliper log)의 일부분을 나타내고 있다. 여기서 3D caliper log는 텔레뷰어 주시이미지로부터 전환된 결과로서 이는 바로 시추공 공벽모양을 재현한 것과 대등하다. 일별하여, 그라우팅 전·후 절리에 대한 진폭치 및 공경에는 큰 변화가 있음이 관찰되고 있다. 우선 그의 공경이 주위 암반의 것에 근접하고 있음은 무엇보다 열린절리가 그라우팅 매질로 충전되었음을 입증하는 것이 되며 동시에 그의 진폭치는 그라우팅 매질의 물성(reflectivity)을 반영하고 있다. 상기 현장실험에서 관찰된 텔레뷰어 진폭 및 주시이미지는 시추공 주위 그라우팅 상태를 명백하게 보여주고 있음을 볼 수 있다. 여기에는 충전물에 대한 고유 진폭치와 공경(주시)의 변화가 우선 그라우팅 성과의 정량적인 판단을 위한 훌륭한 자료가 된다.

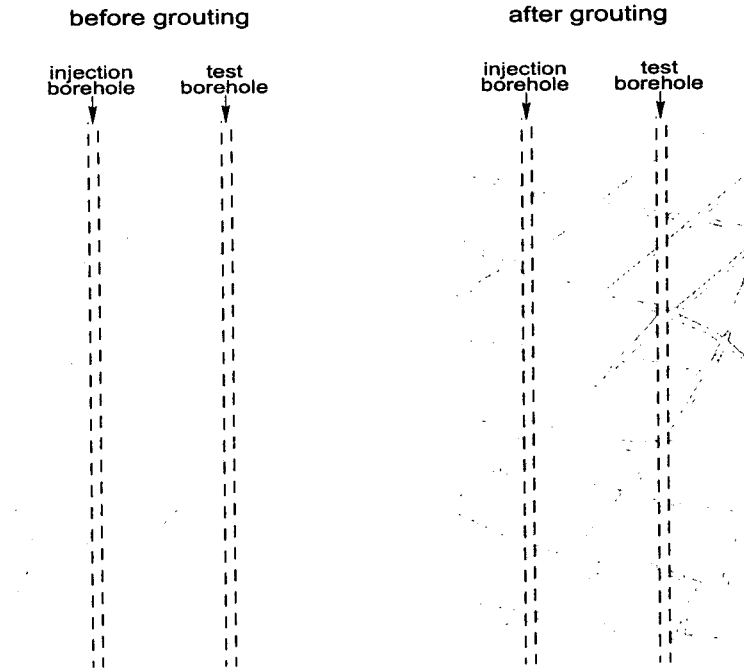


그림 1. 절리암반내 지하수유동은 주로 절리를 통하여 이루어지고 있다. 시추공 공벽은 절리의 열린상태를 관찰할 수 있는 훌륭한 여건이 되며 그것은 바로 텔레뷰어의 고분해능(144다리) 공경검층 기능(3D caliper log)에 의해 쉽게 파악될 수 있다.

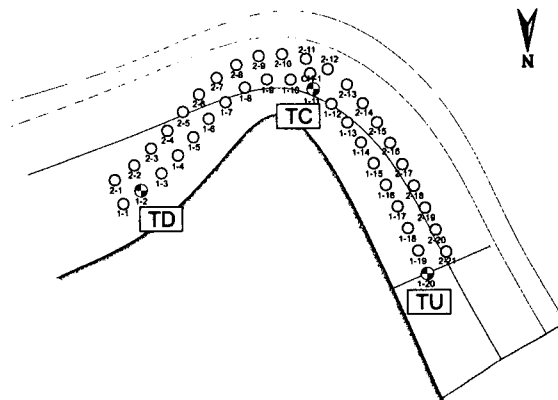


그림 2. 그라우팅 성과 판단을 위한 실험시추공(TD, TC, TU)과 그 주위 배열된 그라우팅 시추공(약 2m간격)의 위치를 나타내고 있다. 실험 시추공에서는 그라우팅 전·후로 텔레뷰어 탐사가 동일한 여건하에서 수행되었다

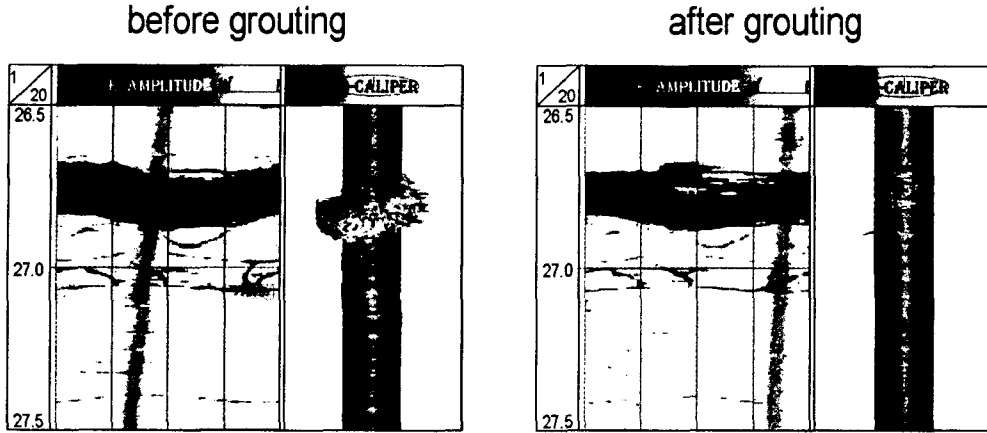


그림 3. 시추공 TD에서 관찰된 팔목할만한 큰 절리에 대한 그라우팅 전·후 텔레뷰어 이미지(좌: 진폭이미지, 우: 주시이미지)를 3D caliper log로 전환한 결과)를 상호 대조하고 있다. 그라우팅 이전 절리에 대한 진폭치 및 공벽의 열린 상태가 그라우팅 이후에는 상대적으로 큰 진폭치를 나타내며 동시에 3D caliper log에서는 공벽이 닫힌상태로 관찰되고 있다.

그러나, 그의 정량적인 판단을 위해서는 무엇보다 다음에 열거하는 여러 가지 문제점에 대한 대처방안이 요구되고 있다.

- 만약, 진폭이미지에서 풍화암이나 혹은 틈새가 작은 절리의 진폭치가 충전물의 것과 대등할 경우 그들을 분리(정량화)할 수 있는 알고리즘 설정에는 상당한 어려움이 수반된다. 따라서, 그라우팅의 정량적인 분석을 위해서는 오히려 주시이미지가 보다 적절한 기본 자료가 된다고 볼 수 있다.
- 센서장치가 시추공축 상에 놓여있는 경우 측정된 주시이미지 혹은 공경은 모든 방위각에 대해 거의 동일한 값을 갖게 된다. 그러나 현장운동 과정에서 센서장치는 흔히 여러 가지 원인(예: 시추공의 휜, centralizer의 부실한 기능)에 의해 시추공 축으로부터 다소 이탈(수 mm)하게 된다. 이러한 경우 측정된 공경은 겉보기 값(pseudo caliper)을 나타내며 그 변화폭은 이탈되는 정도에 따라 크게 달리하게 된다. 따라서, 상기 겉보기 공경치를 실 공경치로 전환하는 알고리즘의 개발은 바로 그라우팅 효과의 자동 정량화를 위한 바탕이 된다.
- 주시이미지에서 관찰되는 절리틈새는 실제로 모든 방위각에 대해 균등하지 않으며 때에 따라서는 단지 일부 방위각 범위에서만 열린 상태가 관찰될 수 있다. 이러한 면을 고려한다면 각 절리에 대한 틈새산출보다는 오히려 단위 심도구간(예: 1m)의 이미지 면적으로부터 절리의 열린 면적을 발체하는 것이 그라우팅 자동 정량화를 위한 보다 현실적인 대처방안이 될 수 있다.
- 미세절리(틈새 1mm이하)에 의해 초래되는 주시변화는 근소하며 동시에 그 변화는 공벽의 거칠음(roughness)에 의한 것과 대등하기 때문에 이들을 분리할 수 있는 적절한 알고리즘 개발이 요구된다.
- 센서장치로부터 방사되는 초음파빔의 주 에너지 폭 즉, spot size는 주시이미지의 절리틈새 분해능과 직접적으로 연관된다. 즉, spot size가 작을수록 그만큼 보다 미세한 절리의 열린 상태를 관찰할 수 있다는 것이다. 독일 DMT사가 개발한 텔레뷰어 측정시스템 FACSIMILE40-20의 초음파빔 spot size는 약 3mm×3mm에 달하고 있으며 이는 현 기술수준에서 최대 분해능을 나타내고 있다. 본 현장실험은 바로 상기 측정시스템에 의해 수행되었기 때문에 그로 인한 이미지 분

해능은 절리틈새 산출결과에 대한 불확실성을 거의 배제할 수 있는 것이 되었다.

다음은 상기 내용을 바탕으로 그라우팅 결과의 정략적인 판단을 위한 알고리즘 개발과정을 서술하고 있다.

### 3. 절리틈새 자동산출법에 의한 그라우팅 성과 판단

시추공을 이용하여 절리 발달상태를 정확하게 규명할 수 있는 검증기법으로는 상기 텔레뷰어 이외에도 BIPS(Borehole Image Processing System)와 FMS(Formation MicroScanner)를 들 수 있다. BIPS는 빛을 이용하여 공벽을 디지털 촬영하는 기술이기 때문에 본 논문에서 관심의 초점이 되고 있는 절리는 주위 암석과 비교하여 단순히 색깔로 차별화 된다. 그런데, 색깔은 전산화를 위한 적절한 입력데이터가 될 수 없다. 한편, FMS에 의한 절리판단 기준은 비저항치이다. 만약 이미지가 단지 전산화를 가능하게 하는 어떠한 값으로 표현된다는 면만 고려한다면 FMS이미지는 텔레뷰어의 것과 대등하다고 할 수 있다. 그런데, 텔레뷰어는 부차적으로 절리의 열린 상태도 가늠할 수 있는 주시이미지를 얻게 하며 동시에 그것은 주시치로 표현된다. 이러한 측면에서 텔레뷰어 데이터는 절리틈새 자동 전산화를 위한 최적의 자료가 되는 것이다.

절리틈새 산출을 위한 기준치가 응용되기 이전 우선 상기 센서장치 이탈에 대한 주시이미지 교정이 선행되어야만 바람직한 결과가 보장될 수 있는 것이다. 그림 4(a)는 주시이미지 교정을 위해 독자적으로 개발한 곡선 정합법(curve matching algorithm; 예: press, 1986)으로 계산된 결과(실선으로 표시)를 측정된 주시변화(실선)와 관련하여 나타내고 있다. 비교효과를 위해 점선은 일정폭 상향 이동되었다. 그들은 상호 훌륭하게 대응되고 있음을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 측정된 주시변화가 상기 정현곡선(점선)을 바탕으로 교정된 상태를 나타내고 있다. 그림 4(c)는 상기 교정기법에 의해 왜곡된 주시이미지가 정상으로 전환된 상태(이탈된 센서장치가 다시 시추공 축상으로 되돌아온 것과 대등)를 보여주고 있다. 이러한 주시이미지 교정기법 개발은 부차적으로 다음과 같은 또 다른 유용한 결과를 낳게 하였다. 즉,

- 절리틈새 규명을 위한 주시 기준치가 곡선 정합법에 의해 자동으로 설정될 수 있다.
- 곡선 정합법에 의해 주시이미지로부터 시추공 공경을 자동으로 산출할 수 있게 되었으며 더구나 센서장치 이탈거리도 추정될 수 있다.
- 주시이미지 왜곡으로 인해 틈새 발체가 거의 불가능하였던 미세 절리도 틈새산출을 위해 반영될 수 있다.
- 주시이미지 교정은 향후 진폭이미지 교정을 위한 기본 데이터로 반영될 수 있다.

그림 5는 주시 기준치(error and trial에 의해 선정)가 곡선 정합법에 의해 자동으로 산출되어 보다 효율적이며 정확한 절리틈새 발체를 가능하게 하고 있음을 예시하고 있다.

다음은 상기 절리틈새 자동산출법을 이용하여 각 시추공(TD)주위 그라우팅 성과에 대한 판단과정을 서술하고 있다. 그림 6의 (a)는 그라우팅 이전 단위 심도별(1m)로 산출된 절리틈새를 나타내고 있다. 여기서 심도구간 26m~27m의 틈새(그림 3참조)가 시추공 전 구간에서 가장 큰 값을 보여주고 있다. (b)는 그라우팅 이후의 측정데이터(주시이미지)로부터 이전과 동일한 방법에 의해 산출된 단위심도별 절리틈새를 나타내고 있으며 그들은 다시 이전의 값((a)참조)과 비교하여 개별적인 성과율(%)(c)참조)이 산출된다. 예를 들면 심도구간 20m~21m의 성과율은 약 25%의 저조한 값을 보여주고 있다. (d)는 (a)에 나타난 심도구간별 틈새값을 바탕으로 그에 비례하는 가중치를 산정한 후 그 값을 다시 성과율(c)참조)과 곱함으로써 얻게되는 상대적인 성과율을 나타내고 있다. 따라서, 전 심도구간을 대상으로 한 최종 그라우팅 성과율은 (d)에 나타난 개별적인 성과율을 합한 것이 되며 그 결과는 약 84.4%에 달하고 있다. 그림 7에는 상기 분석결과를 가능하게 하는 프로그램 "GraTel"의 핵심 알고리즘을 요약하고 있다. 절리틈새를 산출할 수 있는 재래의 프로그램 "Aversa"(김중열외, 1999)는 대체로 텔레뷰어 진폭이미지에 중점을 둔 것이기 때문에 그의 운용과정에는 여러 가지 입력자료(예: 진폭 기준치, 가중치)가 신중하게 선

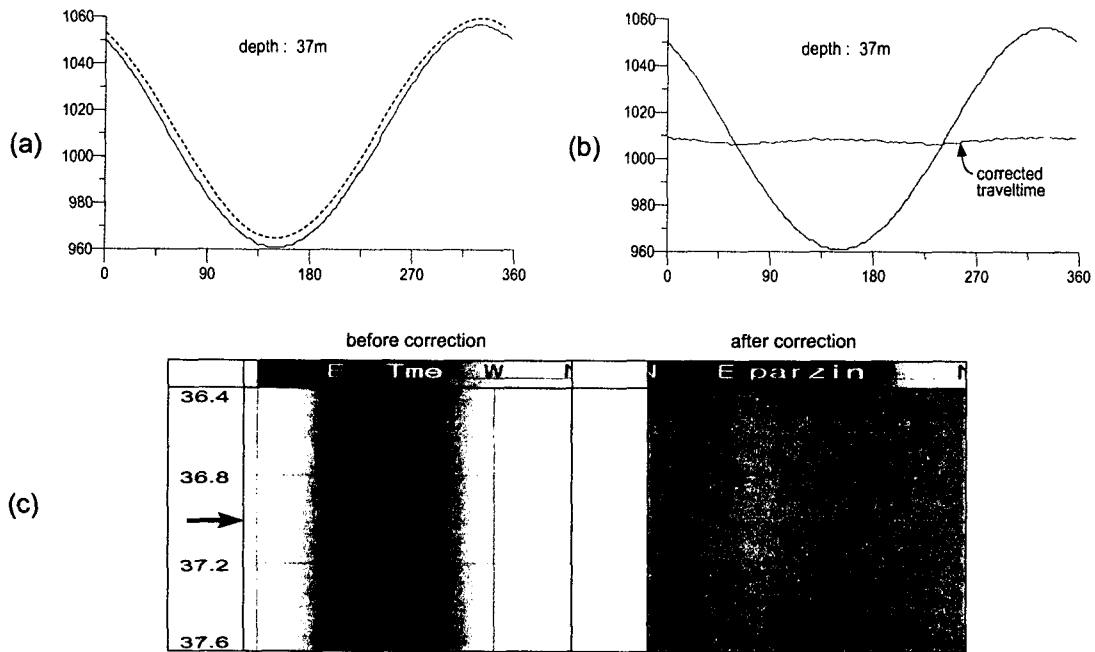


그림 4. 왜곡된 주시이미지의 교정. (a) 센서장치 이탈거리에 따라 역산된 결과(직선)와 실제 측정된 주시변화는 거의 일치하고 있다. (b) 교정된 주시변화, (c) 교정 전·후의 주시 이미지.

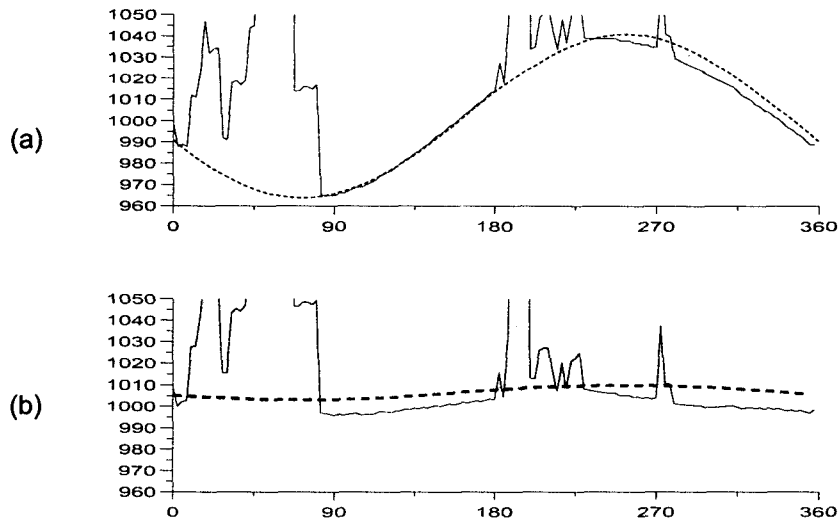


그림 5. 왜곡된 주시이미지의 교정. (a) 센서장치 이탈거리에 따라 역산된 결과(점선)와 실제 측정된 주시변화(절리를 내포한)는 서로 잘 대응되고 있다. (b) 자동으로 설정된 주시 기준치가 점선으로 표시되고 있다.

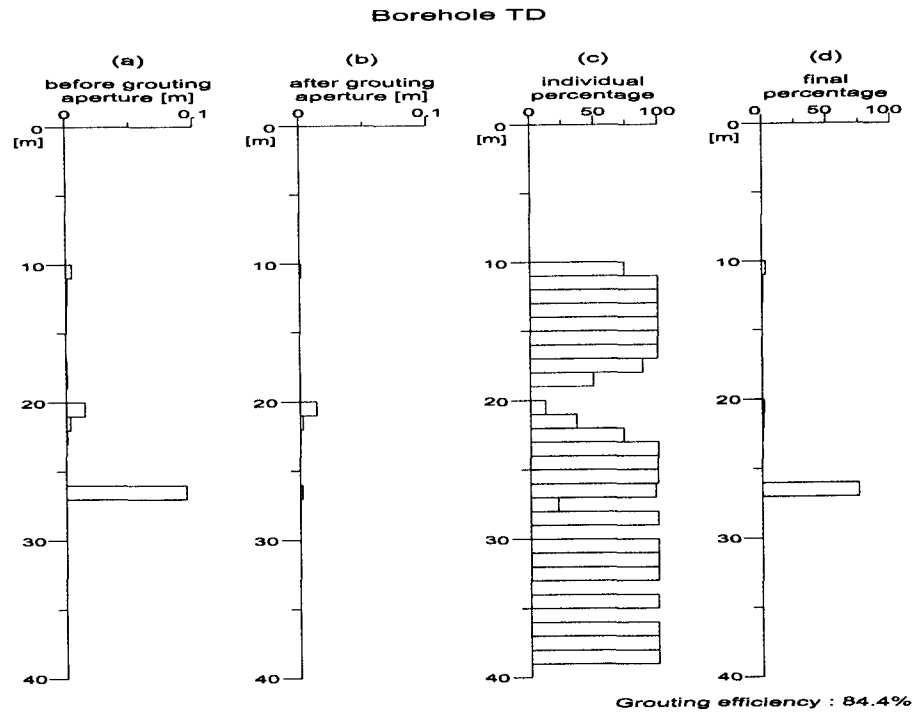


그림 6. 그라우팅 성과에 대한 정량적인 판단. 그라우팅 전·후 단위심도별 절리틈새의 상대비교는 심도에 따른 개별적인 성과 판단은 물론 전 심도에 대한 판단도 가능하게 한다.

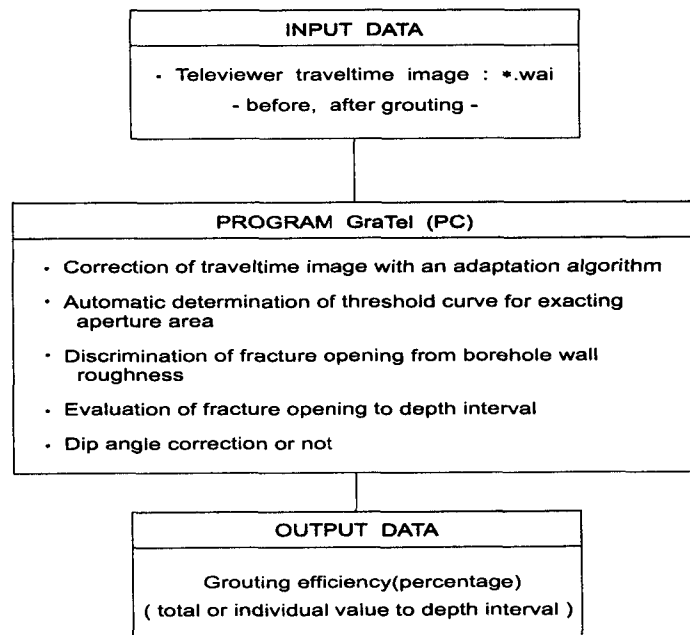


그림 7. 그라우팅 성과를 자동 산출 알고리즘의 주요 연산과정

정되어야 하였다. 그러나, GraTel은 무엇보다 그의 운용과정에서 단지 주시이미지만 입력하면 여러 가지 교정이 자동으로 이루어지기 때문에 그의 응용면에서 간편한 이점이 있다고 하겠다.

#### 4. 결 론

절리암반내 용질유동(예: 지하수, 방사능)은 주로 절리를 통하여 이루어진다. 이에 대처하는 그라우팅의 주된 목적은 절리를 특수매질로 채움으로써 우선 지하수 유동을 차폐함은 물론 나아가서 암반의 전단강도를 크게 높이는 데 있다. 따라서, 그라우팅 성과에 대한 기본 판단은 무엇보다 절리의 채워짐 여부를 확인하는 데 있다고 할 수 있다. 여기서 시추공은 이를 관찰할 공벽을 제공하게 되며 그를 통한 절리의 열린상태는 텔레뷰어 데이터(진폭 및 주시 이미지)에 의해 고분해능으로 관찰될 수 있음을 보여주었다. 나아가서 본 논문에는 텔레뷰어 고분해능 공경검층 기능을 활용하여 그라우팅 성과를 정량적으로 판단할 수 있는 하나의 효율적인 분석기법을 소개하였으며 그에 따라 개발된 프로그램 "GraTel"은 다음과 같은 유용한 결실을 낳게 하였다. ① 왜곡된 주시이미지를 교정할 수 있는 알고리즘 개발을 통해 시추공 공경과 센서장치의 이탈거리를 정확하게 파악할 수 있다. 여기서, 계산된 이탈거리는 향후 왜곡된 진폭이미지의 교정을 위한 귀중한 자료가 된다. ② 절리틈새가 자동으로 산출될 수 있게 되어 그라우팅 성과에 대한 정량적인 판단이 가능하였다. 한편, 이러한 정보는 그 자체로 지하수 유동 연구를 위한 기본자료가 된다. ③ 그라우팅 성과를 판단과정에는 그라우팅 설계 및 보강에 대한 정보가 내포되어 있다.

#### 5. 참 고 문 헌

1. 김중열, Schepers, R.(1995), "고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능", *대한지질공학회지*, 제 5권, 제 3호, pp. 277-288.
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. Press, W.H.(1986), *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge.
5. Hane, E. and Saito, H.(1966), "Quality assessment of cement-mixed soil ground by S-wave tomography", *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi and Shibazaki(eds), Balkema, Rotterdam, pp. 129-132.
6. Imamura, S., Nakajima, A., Mitsuishi, S.(1966), "Evaluation of soil improvement using borehole resistivity profiler", *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi and Shibazaki(eds), Balkema, Rotterdam, pp. 613-618.