

심부시추코어를 활용한 불연속면의 분포 특성 및 통계학적 해석

최정해¹ · 정유진² · 천대성^{3*}

¹경북대학교 지구과학교육과, ²매사추세츠 공과대학교 토목환경공학과,

³한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부 심층처분환경연구센터

Distribution and Statistical Analysis of Discontinuities in Deep Drillcore

Junghae Choi¹ · Youjin Jung² · Dae-Sung Cheon^{3*}

¹Professor, Department of Earth Science Education, Kyungpook National University

²Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology

³Principal Researcher, Deep Subsurface Storage and Disposal Research Center, Geology & Space Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

This study undertook a quantitative analysis of the distribution of fractures in deep drillcore from a Precambrian metamorphic complex on the north face of Hongcheon-gun, Gangwon-do, Korea. The fracture distribution with depth, inclination of fractures, and grain size in the fracture zone were measured and statistical techniques applied to derive probability distributions of fracture intervals. Analysis of the inclination angles of fracture planes showed that sub-horizontal fractures are dominant, and fracture spacing is mainly ≤ 0.5 m, with a median of 0.09 m, first quartile of 0.04 m, and third quartile of 0.18 m, indicating very dense fracture development. Statistical analysis of joint properties was undertaken with fitting using five probability density functions (double Weibull, exponential, generalized logistic, gamma, and lognormal). The lognormal distribution (sum of squared errors, SSE = 2.80) yielded the best fit based on the sum of residual squares. Quantitative characterization of the fracture characteristics of deep bedrock in the Hongcheon area is important for various geotechnical applications such as groundwater flow modeling, slope stability assessment, and underground structure design. In future studies, it will be necessary to combine *in situ* stress measurements and geophysical surveys to determine the relationship between fracture development and the local stress field.

Keywords: joint distribution, deep drilling core, probability density function, joint spacing

초 록

본 연구는 강원도 홍천군 북방면에 위치한 선캄브리아기 변성암 복합체를 대상으로 심부 시추코어의 절리 분포 특성을 정량적으로 분석하였다. 절리의 분포 심도, 경사각, 그리고 파쇄대 내 파편입자 크기를 측정 후, 통계학적 기법을 적용하여 절리 간격의 확률분포를 도출하였다. 절리면의 경사각 분석 결과, 아수평절리가 가장 우세하게 나타났으며, 절리면 간격 분석에서는 0.5 m 이하의 간격이 지배적이었으며, 중위수 0.09 m, 제1사분위수 0.04 m, 제3사분위수 0.18 m로 나타나 매우 조밀한 절리 발달 양상을 보였다. 통계학적 분석을 위해 double Weibull, exponential, generalized logistic, gamma, lognormal 등 5가

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Dae-Sung Cheon
E-mail: cds@kigam.re.kr

Received: 11 September, 2024

Revised: 21 September, 2024

Accepted: 25 September, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지 확률밀도함수와의 피팅을 수행하였으며, 잔차제곱합(sum of squared errors, SSE) 기준 lognormal 분포(SSE = 2.80)가 가장 적합한 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 홍천 지역 심부 암반의 절리 특성을 정량적으로 규명함으로써, 지하수 유동 모델링, 사면 안정성 평가, 지하 구조물 설계 등 다양한 지질공학적 응용 분야에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 현장 응력 측정 및 지구물리학적 탐사 기법을 병행하여 절리 발달과 현지 응력장의 관계를 규명하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 절리 분포, 심부시추코어, 확률밀도함수, 절리 간격

서론

암반 내 불연속면, 특히 절리는 암반의 역학적, 수리학적 특성을 지배하는 핵심 요소로서 지질공학 및 암반공학 분야의 중요한 연구 대상이다. 절리의 분포, 방향성, 간격 등은 지하 구조물의 설계 및 시공, 사면 안정성 평가, 지하수 유동 해석 등 다양한 응용 분야에 결정적인 영향을 미친다(Hudson and Harrison, 1997; Bahaaddini et al., 2013).

그러나 심부 암반의 절리 특성을 직접적으로 관찰하고 측정하는 것은 현실적으로 상당한 제약이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위해 시추코어 분석, 공내 영상화 기법, 지구물리탐사 등 다양한 간접적 방법들이 개발되어 왔으며, 특히 시추코어 분석은 심부 암반의 실제 상태를 직접적으로 관찰할 수 있는 중요한 수단으로 인식되고 있다(Bieniawski, 1973; Priest, 1993).

본 연구는 강원도 홍천군 북방면에 위치한 심부 시추공에서 채취한 코어 시료를 대상으로 절리 특성을 종합적으로 분석하는 것을 주요 목적으로 한다. 기존의 많은 연구들이 주로 지표 근처의 천부 암반이나 노두를 대상으로 한 반면(Jaeger, 1959; Patton, 1966; Barton, 1972, 1973, 1976; Barton and Choubey, 1977; Bandis et al., 1983; Kulatilake et al., 1995), 본 연구는 심부 시추공 코어 시료를 분석함으로써 심부 암반의 절리 특성에 대한 귀중한 정보를 제공한다는 점에서 차별성을 갖는다. 특히, 파쇄대의 영향을 포함한 분석을 수행함으로써, 기존 연구들에서 간과되었던 파쇄대가 전체 절리 네트워크에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

전 구간 시추코어에 대한 체계적인 육안조사를 실시하였으며, 절리의 분포 심도, 경사각, 그리고 파쇄대 내 입자 크기를 주요 조사 항목으로 선정하였다. 절리의 공간적 분포를 정확히 파악하기 위해, 시추코어의 중심축을 기준으로 각 절리의 심도를 측정하였으며, 연속된 절리 간의 간격은 이들 심도 값의 차분을 통해 산출하였다. 절리면의 방향성을 정량화하기 위해, 수평면과 절리면이 이루는 예각을 경사각으로 정의하고 이를 측정하였다. 파쇄대 구간에 대해서는 입도 분포 분석을 실시하여 최빈 입도를 대표 입자 크기로 채택함으로써, 파쇄 정도를 객관적으로 평가하고자 하였다.

이번 연구의 주요 특징 중 하나는 Lowess(locally weighted scatterplot smoothing) 기법을 적용하여 심도에 따른 절리면 간격 변화를 분석한 것이다. 이를 통해 기존의 단순 선형 회귀 분석으로는 포착하기 어려운 복잡한 비선형적 변화 양상을 효과적으로 규명할 수 있었다. 또한, 다양한 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 이용한 절리 간격 분포의 통계학적 분석을 수행하여, 홍천 지역 암반의 절리 간격 분포가 로그정규분포를 따른다는 것을 실증적으로 밝혀냈다. 이러한 접근은 향후 확률론적 해석의 기초를 마련했다는 점에서 의의가 있다.

연구지역

본 연구지역은 강원도 홍천군 북방면에 위치하며, 지체구조적으로 경기육괴의 동북부에 해당한다. 이 지역의 기반암은 주로 선캄브리아기 변성암 복합체와 중생대 화성암으로 구성되어 있으며, 제4기 충적층이 국지적으로 분포한다.

선캄브리아기 변성암 복합체는 주로 편마암과 편암으로 이루어져 있고 편마암은 주로 호상 편마암과 화강암질 편마암

으로 구분되며, 석영, 장석, 흑운모, 각섬석 등의 광물로 구성되어 있다. 편암은 주로 운모 편암과 석영 편암으로 나타난다. 연구지역의 화강암은 주로 쥐라기 대보화강암에 해당하며, 이는 한반도 전역에 걸쳐 나타나는 대규모 화강암질 관입체의 일부이다. 화강암은 주로 흑운모 화강암과 각섬석-흑운모 화강암으로 구분된다. 특히 북동-남서 방향의 주향이동단층이 우세하게 발달하여 있으며, 이는 중생대 이후의 지각 변동과 관련이 있는 것으로 추정된다(Fig. 1).

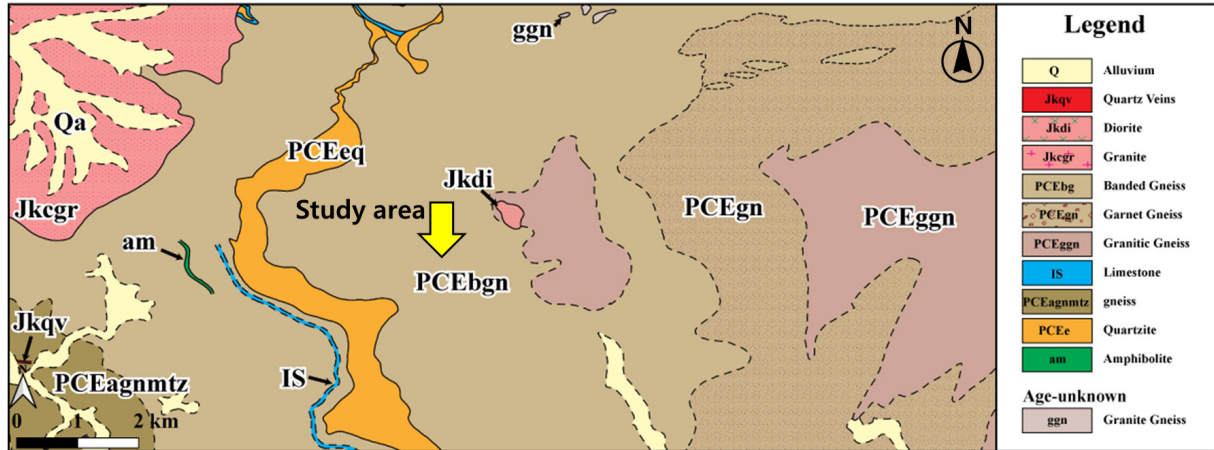


Fig. 1. Geological map of study area (Park et al., 1974; Son et al., 1975).

시료 및 연구방법

본 연구에서는 지반의 불연속면 특성을 정량화하기 위해 채취된 시추코어에 대한 체계적인 육안조사를 실시하였다 (Fig. 2). 조사 대상 항목으로는 절리의 분포 심도, 경사각, 그리고 파쇄대 내 입자 크기를 선정하여 상세히 분석하였다.

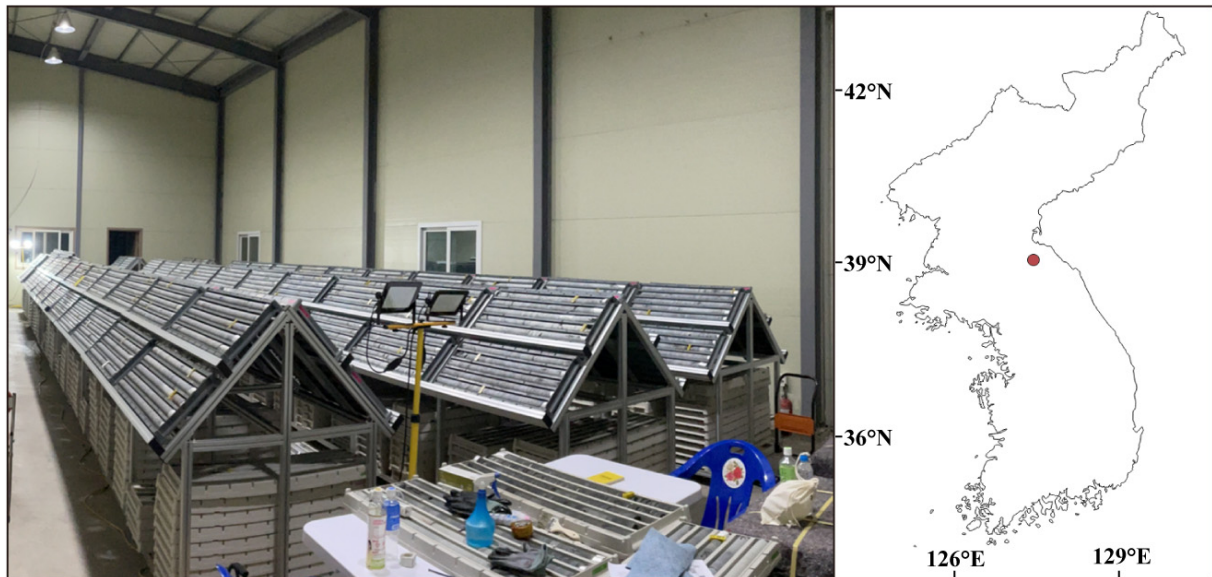


Fig. 2. Deep drillcore samples.

연구 대상 지역의 기반암은 주로 선캄브리아기에 형성된 흑운모 편마암으로 구성되어 있다. 절리의 공간적 분포를 정확히 파악하기 위해, 시추코어의 중심축을 기준으로 각 절리의 심도를 측정하였으며, 연속된 절리 간의 간격은 이들 심도 값의 차분을 통해 산출하였다(Fig. 3). 절리면의 방향성을 정량화하기 위해, 수평면과 절리면이 이루는 예각을 경사각으로 정의하고 이를 측정하였다(Fig. 3의 X). 파쇄대 구간에 대해서는 입도 분포 분석을 실시하여 최빈 입도를 대표 입자 크기로 채택함으로써, 파쇄 정도를 객관적으로 평가하고자 하였다.

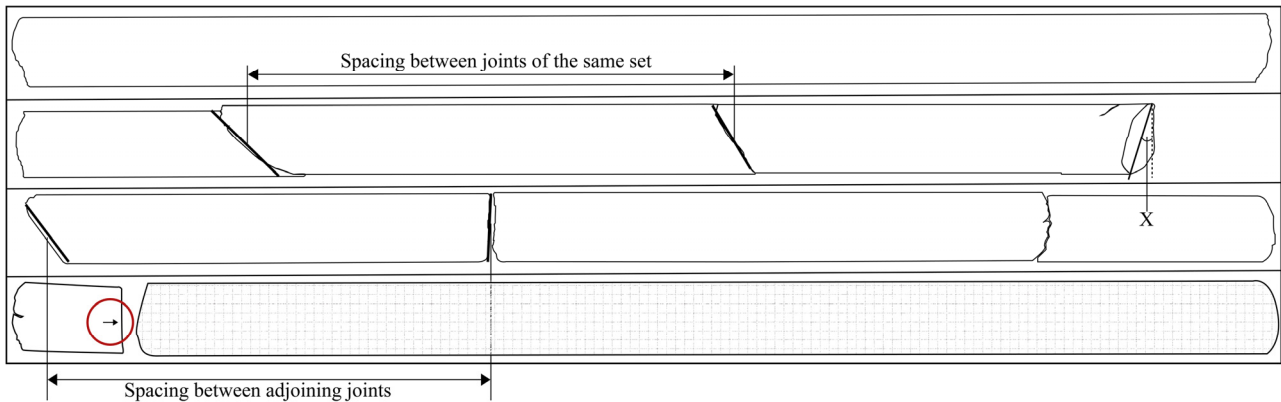


Fig. 3. Schematic of core sample and survey methods.

추가적으로, 현장 지질조사 결과와 시추공 로깅 데이터를 종합적으로 분석한 결과, 특정 구간에서 단층의 존재가 일관되게 확인되었다. 이러한 단층의 존재는 대상 지역의 지질구조 발달 과정 및 현재의 응력 상태를 이해하는 데 중요한 단서를 제공할 것으로 사료된다.

연구결과

절리면의 분포 특성

절리면의 공간적 분포 특성과 파쇄대가 전체 불연속면 네트워크에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해, 파쇄대를 포함한 데이터셋과 포함하지 않은 데이터셋을 비교 분석하였다. 파쇄대 구간 내 절리면의 위치를 정확히 산정하기 위해, 현장에서 관찰된 파쇄대의 시작점과 종결점 사이의 구간을 대표 입도로 등분하여 개별 절리면의 위치를 결정하였다.

연구 대상 지역의 절리 분포 특성을 심도에 따라 시각화하기 위해, 파쇄대를 포함하지 않은 데이터셋과 파쇄대를 포함한 데이터셋 각각에 대해 10 m 간격으로 절리면의 빈도를 분석하였다(Figs. 4 and 5). 각 그래프에서 회색 히스토그램은 10 m 구간 내에 존재하는 절리면의 개수를 나타내며, 적색 곡선은 커널 밀도 추정(Kernel density estimation, KDE) 기법을 적용하여 산출된 확률밀도 함수를 표현한다.

파쇄대를 제외한 데이터셋 분석 결과(Fig. 4), 총 5,032개의 절리면이 관찰되었으며, 심도 증가에 따른 절리 빈도의 전반적인 감소 경향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, 150 m 심도 구간에서 절리면의 분포가 현저하게 집중되는 양상이 확인되었다.

반면, 파쇄대를 포함한 데이터셋 분석 결과(Fig. 5)에서는 총 6,764개의 절리면이 식별되었으며, 심도에 따른 절리 빈도의 감소 경향이 상대적으로 완만하게 나타났다. 특히 500 m 심도 구간에서 절리 빈도의 급격한 증가가 관찰되었는데, 이

는 해당 구간에 발달한 주요 파쇄대의 영향으로 해석된다. 이러한 결과는 파쇄대의 존재가 전체 불연속면 분포 특성에 유의미한 영향을 미치고 있음을 정량적으로 입증한다.

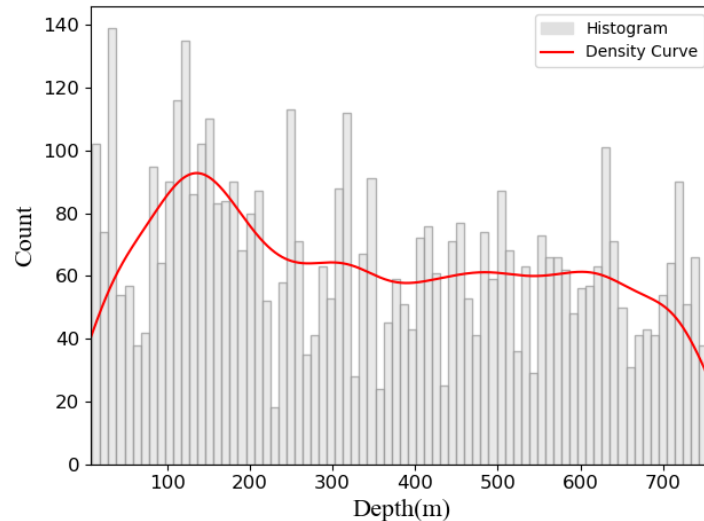


Fig. 4. Distribution of joints with depth (without considering fracture zone).

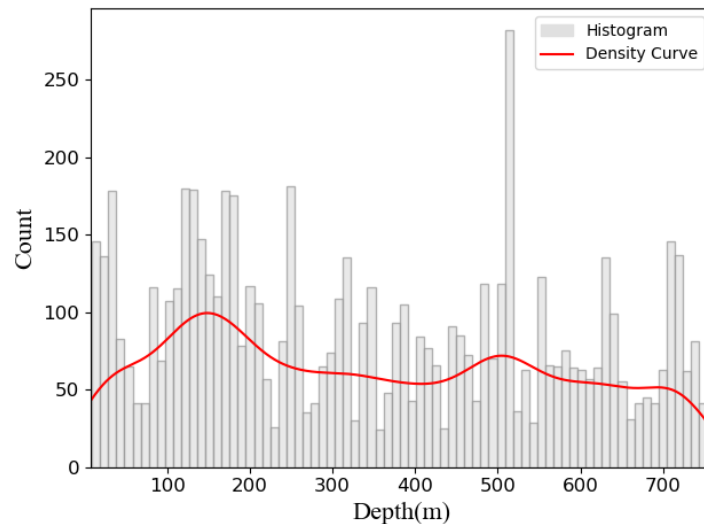


Fig. 5. Distribution of joints with depth (without considering fracture zones).

두 데이터셋 간의 비교 분석을 통해 파쇄대의 존재는 심도에 따른 절리 빈도 감소 경향을 완화시키는 효과가 있고, 150 m 심도 구간에서 관찰된 절리 집중 현상은 해당 심도의 지질학적 특성에 기인한 것으로 판단되며, 500 m 심도 구간에서 확인된 파쇄대는 국부적인 응력 집중 또는 지질구조적 불연속성을 반영하는 것으로 해석된다.

이러한 분석 결과는 연구 지역의 지질공학적 특성을 이해하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 지하 구조물 설계 및 시공 시 주의가 필요한 심도 구간을 식별하는 데 유용한 정보를 제공한다. 또한, 파쇄대를 포함한 불연속면 분포 특성의 정량적 평가는 암반 매질의 수리지질학적 특성 및 지하수 유동 패턴을 예측하는 데도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

각도에 따른 절리면의 분포

본 연구에서는 심부 시추공의 특성을 고려하여 절리면의 자세와 경사각에 대한 분석을 수행하였다. 텔레뷰어를 이용한 절리면 특성 취득의 한계 및 복잡성을 극복하고자, 현장조사에서 직접 측정한 절리면의 경사 데이터를 활용하여 절리군을 분류하였다. 경사각 구분 기준은 Wong et al.(2018)이 제시한 방법론을 채택하였으며, 그 세부 사항은 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Classification scheme for joint dip angles

Joint Set	Dip angle (X)
Horizontal (H)	$0^\circ < X \leq 10^\circ$
Sub-horizontal (SH)	$10^\circ < X \leq 45^\circ$
Sub-vertical (SV)	$45^\circ < X \leq 80^\circ$
Vertical (V)	$80^\circ < X \leq 90^\circ$

파쇄대 구간의 경우, 경사각 측정의 불확실성으로 인해 분석에서 제외하였다. 대신, 파쇄대의 시작과 종결 부분만을 포함하여 절리면 자료를 분류함으로써 데이터의 신뢰성을 확보하고자 노력하였다.

경사각에 따른 절리면 분류 결과, 수직절리(vertical joint, V) 103개, 이수직절리(Sub-vertical joint, SV) 559개, 이수평절리(Sub-horizontal joint, SH) 3,673개, 수평절리(horizontal joint, H) 697개로 집계되었다(Fig. 6). 이러한 분포 특성은 다음과 같이 해석할 수 있다.

- 수직절리의 상대적 저빈도: 시추 방향의 편향성으로 인해 수직에 가까운 절리면이 과소 포집되었을 가능성이 높다. 이는 수직 시추공에서 흔히 발생하는 샘플링 바이어스로, 해석 시 주의가 필요하다.
- 이수평절리의 우세: 연구 지역의 주요 기반암인 흑운모 편마암의 광물학적 특성이 반영된 결과로 해석된다. 편마암의 엽리 구조가 이수평절리의 발달에 지배적인 영향을 미친 것으로 추정된다.

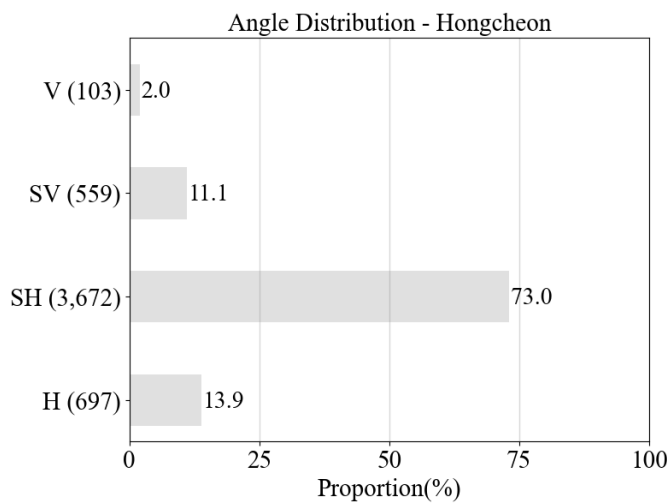


Fig. 6. Dip angle of joints.

경사각에 따라 분류된 절리군의 심도별 분포 양상(Fig. 7)의 결과를 토대로 수평절리는 이중 모드(bimodal) 분포를 나타내며, 150 m와 500~700 m 심도 구간에서 각각 뚜렷한 집중도를 보인다. 이는 해당 심도에서의 지질학적 불연속면 또는 층서적 경계의 존재를 시사할 수 있다. 아수평절리 및 아수직절리에 대해서는 단일 모드 분포를 보이며, 150~300 m 심도 구간에 집중되어 있다. 이는 해당 심도 구간에서의 특정 지질구조적 사건 또는 암석 역학적 특성 변화와 연관될 수 있다. 수직절리에 대해서는 가장 높은 분포 집중도를 보이며, 550 m 심도 부근에 주로 분포한다. 이러한 패턴은 해당 심도에서의 주요 불연속면 또는 응력 집중대의 존재를 암시하는 것으로 해석된다.

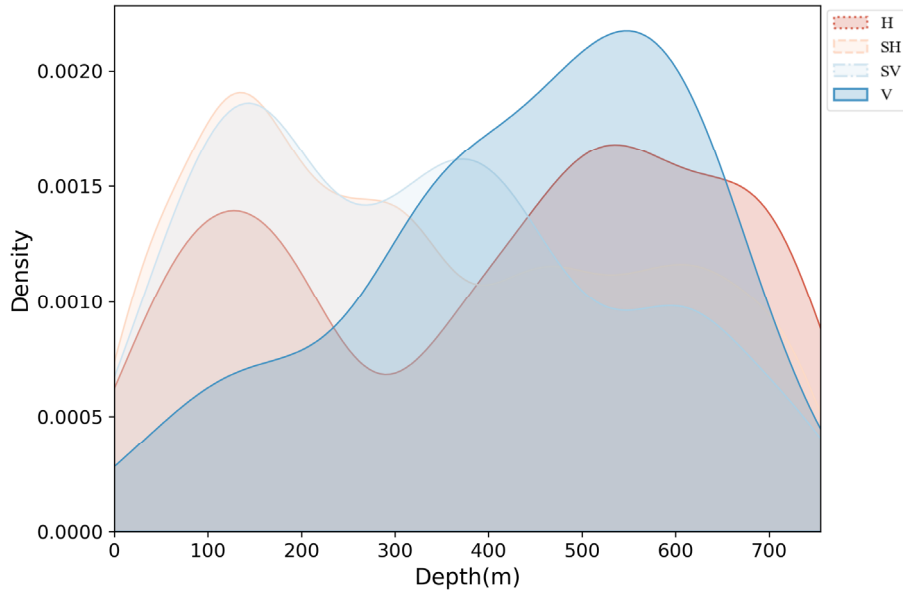


Fig. 7. Density distribution of dip angles with depth.

간격에 따른 절리 분포 특성 해석

본 연구에서 조사된 절리면 간격은 코어박스 내 시료의 중간 지점을 기준으로 측정되었으며, 인공절리면은 시추자의 기록에 따라 배제하고 자연절리면만을 대상으로 실시하였다. 이러한 방법론적 접근은 자연 상태의 암반 불연속면 특성을 정확히 파악하기 위한 것이다.

절리면 간격의 전반적인 분포 특성을 분석한 결과, 0.5 m 이하의 간격을 가지는 절리면이 지배적인 것으로 나타났다(Fig. 8). 이는 연구 지역 암반의 비교적 높은 파쇄도를 시사하며, 지질공학적 관점에서 암반 안정성 및 수리지질학적 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 요소로 판단된다.

절리면 간격의 통계적 특성을 상세히 파악하기 위해 상자수염그림을 활용하였다(Fig. 8). 분석 결과, 제1사분위수는 0.04 m, 중위수는 0.09 m, 제3사분위수는 0.18 m로 나타났으며, 최대 간격은 2.4 m로 확인되었다. 이 결과는 연구 지역의 절리면 간격이 매우 불균질하게 분포하고 있음을 시사한다. 특히, 중위수가 0.09 m로 나타난 점은 연구 지역 암반의 절리 발달이 매우 조밀함을 의미하며, 이는 암반의 공학적 특성 평가 시 주의 깊게 고려해야 할 사항으로 여겨진다.

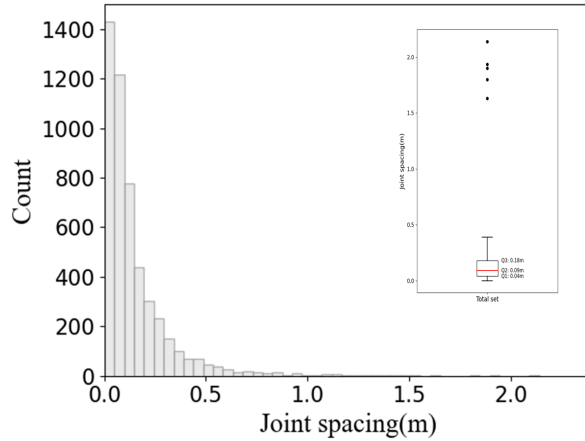


Fig. 8. Histogram and box plot of joint spacing.

절리면 간격의 심도에 따른 변화 양상을 파악하기 위해 Lowess 기법을 적용하였다(Fig. 9). 5%의 대역폭을 사용하여 평활화된 분포를 도출한 결과, 일반적인 예상과는 달리 심도 증가에 따른 절리면 간격의 단조 증가 경향이 관찰되지 않았다. 대신, 국소적인 증감이 반복되는 복잡한 양상이 확인되었다. 이러한 현상은 다음과 같은 지질학적 요인들에 의해 발생했을 것으로 추정할 수 있다.

- 단층대 또는 전단대의 존재: 특정 심도 구간에서 관찰되는 조밀한 절리 간격은 구조적 불연속면의 영향을 받았을 수 있다.
- 암상의 변화: 서로 다른 역학적 특성을 가진 암체 간의 경계부에서 절리 발달 양상이 급변할 수 있다.
- 관입암의 존재: 후기 관입 활동으로 인해 특정 구간에서 상대적으로 넓은 절리 간격이 형성되었을 가능성이 있다.
- 응력장의 불균질성: 심도에 따른 현저응력의 변화가 절리 발달에 영향을 미쳤을 수 있다.

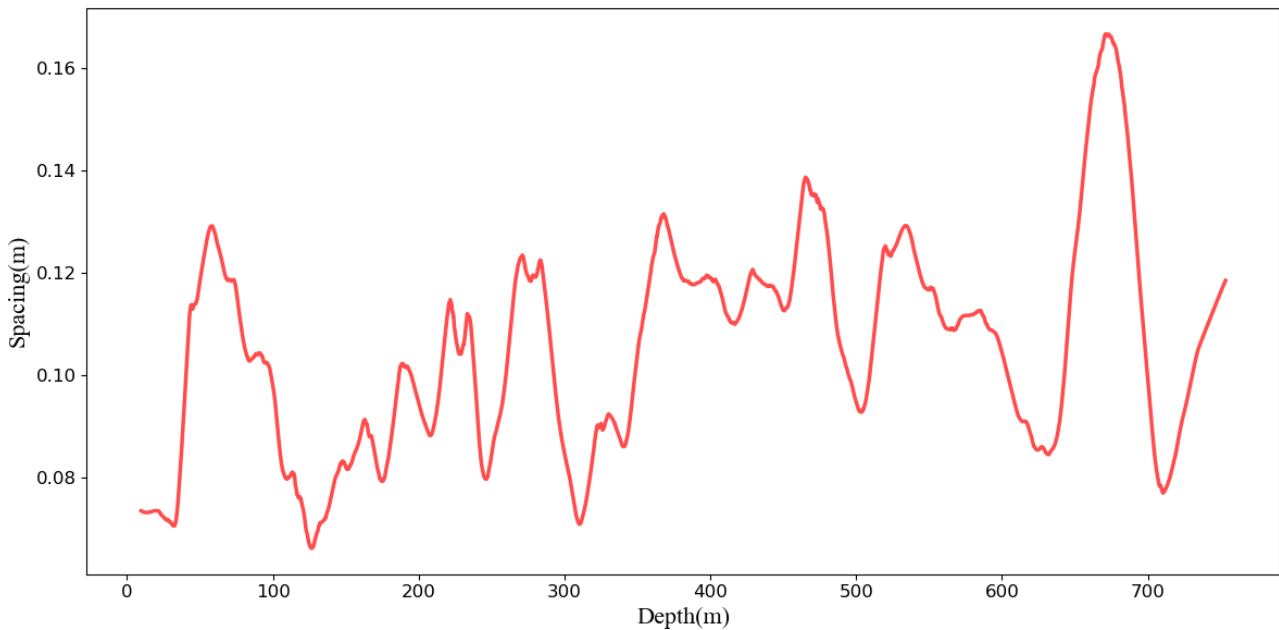


Fig. 9. Distribution of total joint spacing with depth.

이러한 복잡한 절리 간격 분포는 연구 지역의 지질 진화 과정이 다단계적이고 복합적이었음을 시사하며, 향후 상세한 지질구조 분석과 연계하여 해석할 필요가 있을 것으로 생각한다.

경사각에 따른 절리면 구분을 통해 절리간 간격을 분석한 결과(Fig. 10), 절리의 방향성에 따라 특징적인 간격 분포가 관찰되었다. 평균 간격은 아수평절리, 수평절리, 아수직절리, 수직절리 순으로 증가하는 경향을 보였다. 수직절리의 상대적으로 큰 평균 간격은 수직 시추공에서의 샘플링 바이어스로 인해 수직에 가까운 절리가 과소 표집되었기 때문으로 판단된다. 따라서 수직절리의 실제 발달 빈도는 관찰된 것보다 높을 가능성이 있다. 아수평절리의 조밀한 간격은 연구 지역의 주요 기반암인 흑운모 편마암의 엽리 구조가 아수평절리의 발달에 지배적인 영향을 미친 것으로 해석된다. 이는 암석의 이방성이 절리 발달에 미치는 영향을 잘 보여주는 사례이다. 수평절리와 아수직절리의 중간적 특성은 암반의 응력 상태와 지질구조적 요인의 복합적 작용 결과로 해석될 수 있다.

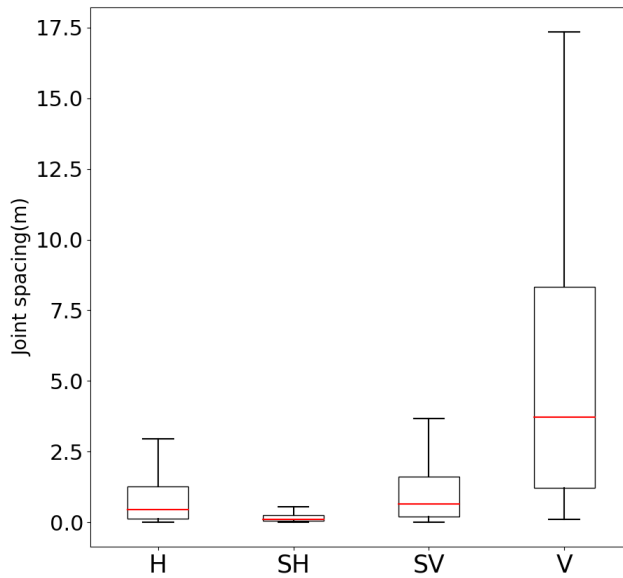


Fig. 10. Joint spacing according to dip angle (H: horizontal, SH: sub-horizontal, SV: sub-vertical, V: vertical).

통계학적 절리 간격 분포 해석

확률밀도함수(PDF)는 데이터의 분포특성을 해석하고 수식으로 기술할 수 있게 한다. 전체 절리면의 간격에 대해서 문헌조사를 통해 절리면 간격의 분포로 제시된 5가지 확률밀도함수와의 피팅을 진행하였다(Freedman and Diaconis, 1981; Ivezić et al., 2014). Python을 활용하여 double Weibull, exponential, generalized logistic, gamma, lognormal 5개의 확률밀도함수와 피팅하여 잔차제곱합(sum of squared errors, SSE)을 기준으로 가장 적합한 확률밀도함수를 도출하고 SSE 값이 최소가 되는 가장 피팅 결과가 좋은 매개변수(parameter) 값을 추정하였다.

Double Weibull distribution의 PDF는 아래와 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f(x) = \frac{\sigma}{2|x|^{\sigma-1}e^{(-|x|^\sigma)}} \tag{1}$$

여기서, x 는 실수이고 $\sigma > 0$ 이며, σ 는 shape parameter를 나타낸다.

Exponential distribution의 PDF는 다음과 같이 식 (2)로 표현된다.

$$f(x) = \lambda e^{(-\lambda x)} \tag{2}$$

여기서, $x \geq 0, \lambda > 0$ 이며, λ 는 rate paramter이다.

Generalized logistic distribution의 PDF는 아래와 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(x) = \sigma \frac{e^{(-x)}}{(1 + e^{(-x)})^{(\sigma+1)}} \tag{3}$$

여기서, $x \geq 0, \sigma > 0$ 이며, σ 는 shape parameter이다.

Gamma distribution의 PDF는 다음 식 (4)와 같다.

$$f(x) = \frac{x^{\sigma-1} e^{-x}}{\Gamma(\sigma)} \tag{4}$$

여기서, $x \geq 0, \sigma > 0$ 이며, σ 는 shape parameter이고, $\Gamma(\sigma)$ 는 gamma function이다.

Lognormal distribution의 PDF는 아래 식 (5)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{(x - \theta)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x - \theta)/m)^2}{2\sigma^2}} \tag{5}$$

여기서, $x > 0, \sigma > 0$ 이고, σ 는 shape parameter이고, θ 는 location paramter, m 은 scale parameter이다.

피팅 결과의 기준으로 사용된 SSE는 아래의 식 (6)을 통해 계산된다.

$$SSE = \sum_i (Y_i - pdf(X_i))^2 \tag{6}$$

여기서, X_i 는 i 번째 관측 값, 즉 본 자료에서는 절리면 간격 값을 의미하고 Y_i 는 절리면 간격의 실제 확률밀도 값을, $pdf(X_i)$ 는 이론상 계산된 X_i 의 확률밀도 값을 의미한다.

분포 피팅을 진행한 결과는 Table 2와 같이 SSE값이 가장 낮은 2.80을 보이는 lognormal distribution이 가장 적합한 것으로 나타났으며, 각 PDF별로 SSE가 가장 작은 매개변수 값으로 기술한 절리면 간격의 분포는 Fig. 11과 같다.

Table 2. Results of fitting the joint spacing distribution

Rock type	Location	Joint set	SSE				
			Double Weibull	Exponential	Generalized logistic	Gamma	Lognormal
Metamorphic	Hongcheon	Total	37.95	4.29	32.54	50.67	2.80

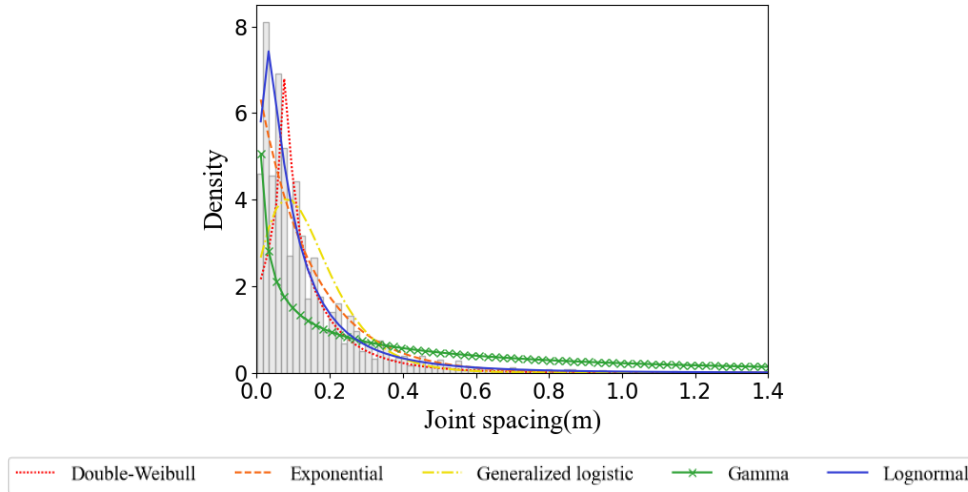


Fig. 11. Minimum SSE fitting results for joint density versus spacing, for each probability density function.

위 결과를 바탕으로 홍천지역의 절리면 간격분포를 나타내는 확률밀도함수의 형태는 lognormal 형태가 가장 우수한 것으로 나타났다. SSE 값의 최소화를 위해 조정된 식 (5)의 각 인자 값들은 아래 Table 3에 정리되었다.

Table 3. Values of parameters in Eq. (7)

Rock type	Location	Adjusted parameter		
		σ (shape)	θ (location)	m (scale)
Metamorphic rock	Hongcheon	0.087	-0.001	0.087

이를 바탕으로 최종 확률밀도함수는 아래와 같이 식 (7)로 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{0.087(x + 0.001) \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x + 0.001)/0.087)^2}{0.015}} \quad (7)$$

결론

본 연구에서는 강원도 홍천 지역의 심부 시추코어를 대상으로 절리의 분포 특성을 체계적으로 분석하였다. 연구 결과, 절리면의 분포, 경사각, 간격 등에서 다음과 같은 주요 특징이 확인되었다.

첫째, 절리면의 심도별 분포 분석 결과, 파쇄대를 고려하지 않은 경우 심도 증가에 따른 절리 빈도의 감소 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 파쇄대를 포함한 분석에서는 이러한 경향이 상대적으로 완화되었으며, 특히 500 m 심도 구간에서 절리 빈도의 급격한 증가가 관찰되었다. 이는 해당 심도에 발달한 주요 파쇄대의 영향으로 해석되며, 파쇄대가 전체 불연속면 분포 특성에 미치는 영향을 정량적으로 입증하는 결과이다.

둘째, 절리면의 경사각 분석 결과, 아수평절리가 가장 우세한 것으로 나타났다. 이는 연구 지역의 주요 기반암인 흑운모 편마암의 엽리 구조가 절리 발달에 지배적인 영향을 미친 것으로 해석된다. 경사각에 따른 절리군의 심도별 분포 양상은 복잡한 패턴을 보였으며, 이는 연구 지역의 지질 구조가 다단계적이고 복합적인 진화 과정을 거쳤음을 시사한다.

셋째, 절리면 간격 분석 결과, 0.5 m 이하의 간격을 가지는 절리면이 지배적으로 나타났으며, 중위수는 0.09 m로 확인되었다. 이는 연구 지역 암반의 절리 발달이 매우 조밀함을 의미하며, 암반의 공학적 특성 평가 시 주의 깊게 고려해야 할 사항이다. 심도에 따른 절리면 간격의 변화 양상은 단조 증가하는 경향을 보이지 않고, 국소적인 증감이 반복되는 복잡한 패턴을 나타냈다. 이러한 현상은 단층대 또는 전단대의 존재, 암상의 변화, 관입암의 영향, 응력장의 불균질성 등 다양한 지질학적 요인에 의해 발생했을 가능성이 높다.

마지막으로, 절리면 간격의 통계학적 분포 특성을 분석한 결과, 로그정규분포(lognormal distribution)가 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 홍천 지역 암반의 절리 간격 분포가 대수정규적 특성을 가짐을 의미하며, 향후 불연속면의 확률론적 해석에 활용될 수 있는 중요한 기초 자료가 될 것이다.

본 연구 결과는 연구 지역 심부 암반의 절리 특성을 종합적으로 이해하는 데 중요한 통찰을 제공한다. 특히, 파쇄대의 영향, 절리의 방향성, 간격 분포의 복잡성 등은 향후 지하수 유동 해석, 사면 안정성 평가, 지하구조물 설계 등 다양한 지질공학 적용 분야에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 도출된 절리 특성의 심도별 변화 양상은 심부 암반의 불균질성과 이방성을 이해하는 데 기여할 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 본 연구 결과를 바탕으로 3차원 절리 네트워크 모델링, 수리지질학적 특성과의 연관성 분석, 그리고 지구물리학적 데이터와의 통합 해석 등을 통해 홍천 지역 심부 암반의 특성을 보다 종합적으로 이해할 수 있을 것이다. 이러한 다학제적 접근은 심부 지질 환경의 특성화와 관련된 불확실성을 감소시키고, 보다 정확한 지질공학적 설계 및 예측을 가능하게 할 것으로 기대된다.

사사

본 논문은 한국지질자원연구원 2024년 기본사업의 하나인 ‘HLW 심층처분을 위한 지체구조별 암종 심부 특성 연구 (GP2020-002;24-3115)’ 사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Bahaaddini, M., Sharrock, G., Hebblewhite, B.K., 2013, Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression, *Computers and Geotechnics*, 49, 206-225.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983, Fundamentals of rock joint deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, 20(6), 249-268.
- Barton, N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(9), 255-279.
- Barton, N.R., Choubey, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mechanics*, 10, 1-54.
- Barton, N.R., 1972, A model study of rock-joint deformation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(5), 579-582.
- Barton, N.R., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, 7(4), 287-332.
- Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, 15(12), 335-344.
- Freedman, D., Diaconis, P., 1981, On the histogram as a density estimator: L_2 theory, *Probability Theory and Related Fields*, 57, 453-476.

- Hudson, J.A., Harrison, J.P., 1997, *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*, Elsevier, 456p.
- Ivezić, Ž., Connolly, A.J., VanderPlas, J.T., Gray, A., 2014, *Statistics, data mining, and machine learning in astronomy: A practical Python guide for the analysis of survey data*, Princeton University Press, Princeton.
- Jaeger, J.C., 1959, The frictional properties of joints in rock, *Pure and Applied Geophysics*, 43, 148-158.
- Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H., Morgan, R.M., 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 32(7), 673-697.
- Park, H.I., Chang, K.H., Ko, I.S., Chi, J.M., 1974, *Geological report of the Naepyeong sheet (1:50,000)*, Geological Survey of Korea (in Korean).
- Patton, F.D., 1966, Multiple modes of shear failure in rock, *Proceedings of the 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics*, International Society for Rock Mechanics, Lisbon, 509-513.
- Priest, S.D., 1993, *Discontinuity analysis for rock engineering*, Springer, 473p.
- Son, C.M., Kim, Y.K., Kim, S.W., Kim, H.S., 1975, *Geological report of the Hongcheon sheet (1:50,000)*, Geological Survey of Korea (in Korean).
- Wong, L.N.Y., Lai, V.S.K., Tam, T.P.Y., 2018, Joint spacing distribution of granites in Hong Kong, *Engineering Geology*, 245, 120-129.