

# 대심도 터널 암반 절리 보강을 위한 고점도 그라우팅 주입 성능 평가

## Evaluation of High-Viscosity Grouting Injection Performance for Reinforcement of Rock Joint in Deep-Depth Tunnels

윤 인 국<sup>1)</sup> · 문 준 호<sup>2)</sup> · 김 영 옥<sup>†</sup>

Inkook Yoon · Junho Moon · Younguk Kim

Received: March 19<sup>th</sup>, 2024; Revised: April 8<sup>th</sup>, 2024; Accepted: April 25<sup>th</sup>, 2024

**ABSTRACT** : This study aimed to develop high-efficiency grouting techniques under deep-depth conditions by experimentally verifying the applicability of various injection materials. Particle size analysis and injection model experiments were conducted with Ordinary Portland Cement (OPC) and Micro Cement (MC) to evaluate the injection performance of each material. Using Barton's Cubic Network theory, the rock fracture spacing was calculated for domestic deep-depth standards, specifically below 40 meters underground. The analysis of particle size passability under selected conditions showed that MC could pass through the rock fracture gaps, while OPC could not. According to the results of the injection model experiments using experimental devices and area calculation software, OPC failed in injection due to its larger particle size, whereas MC was capable of injection even under high-viscosity conditions. Based on these findings, the study quantitatively and visually derived the applicability of grouting materials under deep-depth conditions, and high-viscosity MC material is expected to be effective for waterproofing enhancement in deep-depth rock fracture surfaces.

**Keywords** : Grouting, Micro cement, High viscosity, Deep-depth tunnel, Ordinary portland cement, Injection model experiment

**요 지** : 본 연구는 대심도 조건에서 고효율 그라우팅 기술 개발을 목표로 하여, 다양한 주입 재료의 적용 가능성을 실험적으로 검증하였다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 마이크로 시멘트(MC)의 입자 크기 분석 및 주입 모형 실험을 통해 각 재료의 주입 성능을 평가했다. 국내 대심도 기준, 즉 지하 40미터 이하 조건에서 Barton's Cubic Network 이론을 활용하여 암반 절리 간격을 산정했으며, 선정된 조건에서 입자 크기의 통과 가능성을 분석한 결과, MC는 암반 절리 간격을 통과한 반면, OPC는 간극을 통과하지 못하였다. 실험 장치 및 면적 계산 프로그램을 활용한 주입 모형 실험 결과에 따르면, OPC는 입자 크기가 크기 때문에 주입에 실패한 반면, MC는 고점도 조건에서도 주입이 가능한 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과를 바탕으로, 주입 재료에 따른 대심도 조건에서 그라우트 재료의 적용 가능성을 정량적 및 가시적으로 도출하였으며, 고점도 MC 재료는 대심도 암반 절리면 차수 보강에 효과적일 것으로 예상된다.

**주요어** : 그라우팅, 마이크로 시멘트, 고점도, 대심도, 일반 포틀랜드 시멘트, 주입모형실험

## 1. 서 론

암반 그라우팅은 주로 기존 및 신설 구조물 주변 암반의 공학적 성질을 개선하는 대표적인 보강 공법이다. 지하 공간 개발과 대형 구조물 건설 수요의 증가에 따라 강도 증대, 차수성 확보, 내구성 향상을 주목적으로 하는 그라우팅의 필요성이 높아지고 있다. 과거에는 그라우팅이 임시적인 보강이나 보조공법으로 적용되는 경우가 많았으나, 최근에는 다양한 목적으로 그라우팅 수요가 증가하고 있다(Park, 2010). 따라서 그라우팅의 장기적 안정성 확보를 위해 시설물의 중요도와 사용 연한, 주입재의 유동 특성, 주입 방법, 암반 조건 등을 고려하여 그라우팅을 계획해야 하며, 그라우팅 보강

시 그라우트 재료에 대한 성능 평가도 중요하게 고려되어야 한다(Kim & Lee, 2022).

그라우트 재료 주입에 대한 성능 평가는 아직 갈 길이 멀다. 주로 사용되어 온 그라우팅 성능 평가 방법은 굴착을 진행한 후 암반에 직접 시약을 주입하여 그라우트 재료와의 화학 반응을 유도하고, 이를 통해 주입 성능을 개략적으로 확인하고 있다. 이 방법으로 주입 성능을 평가할 경우, 화학약품 사용으로 인한 환경적 문제를 야기할 수 있으며, 대심도와 같은 깊은 지하 공간 개발을 위한 암반 굴착 시 그라우팅의 성능 및 효과 평가/예측에 어려움이 발생할 수 있다. 또한, 주입재의 직접적인 확산 양상과 주입 거리 및 범위를 확인하기 어렵고, 주입재의 성능 평가에 대한 정확도가 떨어지는 문제가 있다.

1) Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

2) Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

† Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University (Corresponding Author : yukim@mju.ac.kr)

이에 본 연구에서는 대심도 암반 절리면의 간격을 이론적으로 조사하고, 이에 대응하는 절리면의 간격을 갖는 구조체로서 마이크로 필터를 활용한 모형 실험 장치를 개발하였다. 개발된 장치를 통해 주입재의 배합비에 따른 그라우트 재료의 확산 양상, 주입 거리 및 범위에 대한 정량적 평가를 시도하였다. 또한, 실험 결과에 따른 데이터 비교·분석을 통해 주입재의 적합성 및 주입 효과 등을 확인하였다.

## 2. 주입이론을 통한 입경 분석

### 2.1 Barton's Cubic Network

암반 절리면 사이로 그라우트의 원활한 주입을 위해서는 암반 절리 간격을 통과할 수 있는 주입 재료의 입자 크기가 중요하다. 절리 간격에 비해 입자 크기가 큰 시멘트를 사용하면, 시멘트 입자가 통과하지 못해 재료 분리가 발생하여 보강 및 차수 효과를 기대하기 어렵다. 반면, 극히 작은 시멘트 입자를 사용할 경우 주입 시 입자 뭉침 현상이 발생하여, 이로 인해 절리면을 통과하지 못하며, 이 또한 그라우팅 효과를 기대하기 어려울 수 있다. Fig. 1은 Barton et al.(2001)이 제안한 절리면 사이로 그라우트 재료가 침투하는 현상을 이상화하여 묘사한 것이다.

Barton et al.(2001)은 평균 조인트 간격(E)과 암반의 거칠기 계수(JRC, Joint Roughness Coefficient)에 기반하여 이상화된 조인트 간격, e와의 상관관계를 제안하였다. 또한 이를 바탕으로 주입되는 암반 조건별 Cubic Network(Fig. 2)를 가정하여 평균 조인트 간격(E)을 산정한 후, 이상화된 절리 간격 e와의 관계를 Eq. (1)과 같이 제시했다.

$$E \approx \sqrt{e \times JRC_0^{2.5}} \quad (1)$$

또한, 심도별 절리 사이의 간격 s와 이상화된 절리 틈 e를 정리하고, 이에 따른 실질적 절리 틈 E를 Fig. 2와 같이 정리하였다.

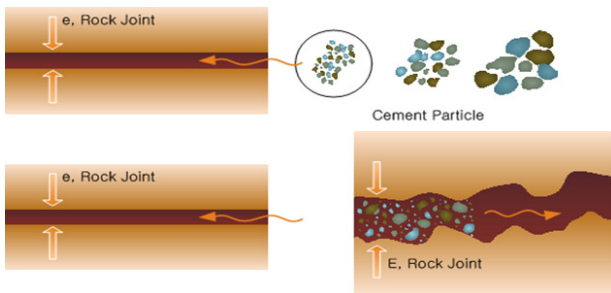
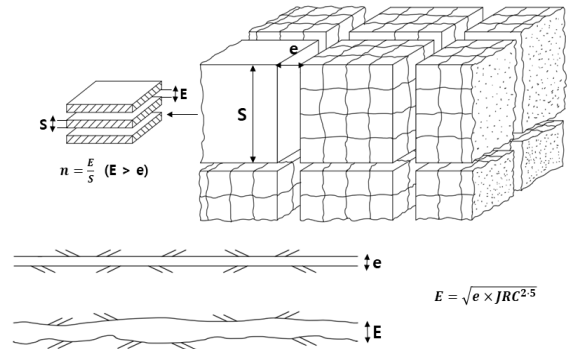


Fig. 1. e and E depending on the roughness of the joint (Barton, 2004a,b)



Depth Zones (m)	S (m)	e (μm)	E (μm)
5~15	0.3	150	218
15~25	0.4	110	186
20~45	0.6	80	159
45~60	0.7	60	138

Fig. 2. Barton's Cubic network (Barton & Quadros, 2019)

그라우팅 재료의 입도분포와 실질적 절리 틈과의 관계는 Eq. (2)와 같으며, 제안된 식에 의하면 심도별로 그라우트 재료가 주입되기 위해서는 입자의 95%가 통과하는 입경이 실질적 절리 틈보다는 25% 이상 작아야 한다는 것을 나타내고 있다.

$$E \geq 4D_{95} \quad (2)$$

국내에서 대심도의 정의는 일반적으로 40m 보다 더 깊은 곳을 지칭하며, 이를 위의 관계식에 적용하면 실질적 절리 틈인 암반 절리 틈(E)는 약 138μm인 것을 알 수 있다.

### 2.2 입경 분석을 통한 암반 절리 간격 통과 가능성 분석

Barton의 이론을 바탕으로 대심도 환경에서 현재 일반적으로 사용되는 주입 재료의 주입 가능성을 입자 크기 분포를 통해 평가했다. 주입 재료로는 일반 포틀랜드 시멘트(OPC)와 00사의 Micro Cement(MC)를 사용하였으며, 입자 크기 분석기(LS230)를 사용해 실험을 수행하였다. 입자 크기 분석기는 레이저 확산 시스템을 이용한 장비로 산란된 빛이 검출기에 감지되어 입자의 크기를 측정하며, 습식 분석 장치로 측정 범위는 0.04μm~2,000μm이며, 모든 상태의 물질을 측정할 수 있다. OPC와 MC 모두 w/c=70%의 동일한 조건에서 실험을 진행하였으며, 입경 분석 결과 Table 1과 같다.

Table 1. Injection material particle size analysis (Yoon et al., 2021)

	OPC	MC
D <sub>50</sub> (μm)	19.49	9.319
D <sub>90</sub> (μm)	52.94	21.76
D <sub>95</sub> (μm)	63.41	33.01
D <sub>max</sub> (μm)	161.2	133.7
Mean (μm)	25.19	12.78
Median (μm)	19.49	9.319

Eq. (2)를 통해 대심도 암반 절리 간격(133.7 $\mu\text{m}$ )과 주입 재료의 입자 크기를 비교해 통과 가능성을 검토하였으며, Table 2와 같이 정리하였다. OPC는 253.64 $\mu\text{m}$ 로 암반 절리 간격보다 크게 나타나 주입 가능성이 없는 것으로 판단되며, MC는 132.04 $\mu\text{m}$ 로 암반 절리 간격을 통과할 수 있는 것으로 분석된다. 입자 크기 분석 실험과 Barton의 이론을 통해 주입 재료의 통과 가능성을 간접적으로 확인하였으나, 이론적 가능성만으로는 실제 현장에서의 주입 가능성을 평가하기에는 부족함이 있는 것으로 판단된다.

Table 2. OPC and micro cement rock joint passibility

	D <sub>95</sub> ( $\mu\text{m}$ )	4D <sub>95</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Passibility
OPC	63.41	253.64	X
MC	33.01	132.04	O

### 3. 주입모형실험

대심도 절리 간격은 실험실 환경에서 구현하기 어렵고, 정량적 주입 가능성을 검토하기도 쉽지 않다. 따라서, 주입 가능성을 평가할 수 있는 새로운 방법을 고안하고, 이를 바탕으로 주입 모형 실험을 수행하여 주입 재료의 적합성 및 주입 효과 등을 검증하였다.

#### 3.1 주입모형실험 장치

그라우트 재료의 주입 성능을 평가하기 위해 주입 모형 실험 장치를 개발하여 적용하였다. 실험실에서 암반 모사가 어려운 점을 고려하여, 그라우팅 시공 시 암반 절리 간격을 모사하기 위해 마이크로 필터를 실험 장치에 장착하였다.

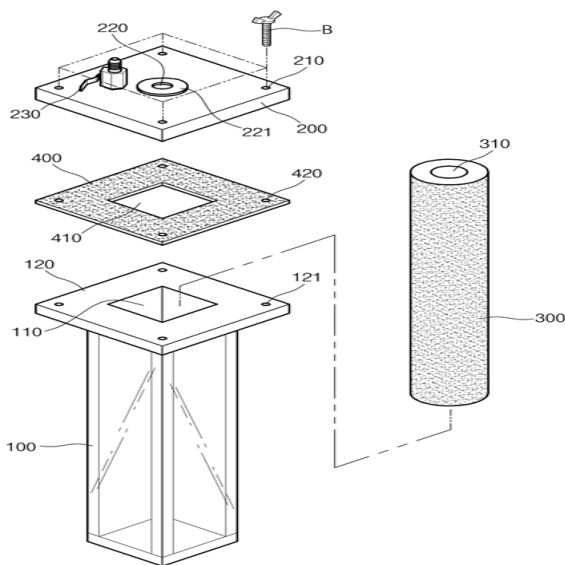


Fig. 3. Injection model experiment device configuration diagram

덮개를 닫고 볼트로 고정된 후 중심부에 주입관을 연결하여 그라우트 재료를 압력으로 분사하였다. 내부 압력은 에어 밸브로 조절할 수 있으며, 시공 상황에 맞는 주입 조건을 설정할 수 있다. 주입이 완료된 후에는 필터를 장치에서 분리하고 약 24시간 동안 주입된 그라우트 재료를 양생시킨 후, 필터를 절단하여 절단면을 전산 면적 계산 프로그램으로 분석하였다. 이를 통해 주입 재료의 확산 양상, 주입 거리 및 범위, 그리고 주입 가능 여부를 대심도 암반의 절리 크기 및 주입압에 따라 조건별로 평가하였다. 고안된 장치의 상세도는 Fig. 3과 같다.

#### 3.2 주입재의 주입양상 실험 및 평가

본 연구에서는 주입된 그라우트 재료의 주입 양상에 대한 정량적 평가를 위해 'Image J' 면적 계산 프로그램을 사용하였다. Image J는 Java를 기반으로 하며, 다른 프로그램과 효율적으로 상호작용할 수 있어, 학술 자료의 이미지 분석에 광범위하게 적용될 수 있다는 장점이 있다(Pettiaux et al., 1997). 또한, 다양한 플러그인이 개발되어 사용 범위나 분석 방법이 지속적으로 확장되고 있다(Ritterger et al., 2004). 분석 방법은 프로그램을 실행한 후 분석할 이미지를 불러오고, 이미지를 8-bit 픽셀로 변환한 뒤, Threshold를 설정하여 원하는 면적을 선택하고 분석한다. 이 과정에서 이미지의 품질이나 대비에 따른 오차에 유의해야 한다. 선택된 영역을 Apply를 통해 확정하면 변환된 흑백(흑:주입 면적율, 백:순 면적율) 이미지에서 면적률을 계산할 수 있으며, 해당 Flow chart는 Fig. 4에 나타내었다.

$$100\% - \text{주입 면적율}(\%) = \text{순 면적율}(\%) \quad (3)$$

주입 성능 평가 장치를 사용하여 주입 재료의 주입 양상에 대한 정량적 평가를 진행하였다. 사용된 주입 재료는 OPC와 MC이며, w/c 비율을 70%, 85%, 100%로 설정하여 주입 실험을 수행하였다. 마이크로 필터의 여과 규격은 실험에

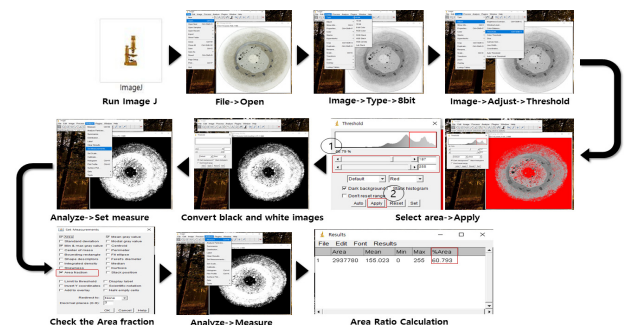


Fig. 4. Image J flow chart

사용된 138 $\mu$ m 암반 절리 간격과 유사한 150 $\mu$ m로 선정하였다. 이는 상용화된 필터 규격에 기반한 것으로 연구 목적에 맞는 필터를 제작할 수 있다면 다양한 주입 성능 평가 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

주입 후, 그라우트 재료를 필터 내에서 양생시킨 뒤, 수압 절단기로 필터를 절단하여 복합 단면을 분석하였다. 고효율 그라우팅을 위한 고압 주입 조건을 고려하여 약 15bar 이상의 주입 압력을 적용하였으며, 절단면 분석은 'Image J' 프로그램을 활용하여 수행하였다.



Fig. 5. Laboratory equipment

#### 4. 실험결과

마이크로 필터의 방사형 구조를 활용하여 그라우트 재료의 주입 가능성을 평가하였으며, 매우 효과적으로 나타났다. 필터(1.6cm)를 통해 측정된 그라우트 재료의 총 주입 가능 거리는 사진 촬영 및 프로그램 분석을 통해 가시적으로 평가하였다. 이를 통해 실험 결과들을 효과적으로 비교 및 분석할 수 있었으며, 결과는 Fig. 6, Table 3과 같다.

OPC의 경우, 입자 크기가 필터재(절리면)의 간격보다 커서 마이크로 필터의 간극을 통과하지 못하고 주입되지 않았다

w/c (%)	Cross sectional analysis image		Injection distance (cm)
70			1.3
85			1.6
100			1.6

Fig. 6. Analysis of the cross-section of micro cement

Table 3. Area ratio and net area analyzed through image J

w/c (%)	Area ratio (%)		Net area ratio (%)	
	OPC	Micro cement	OPC	Micro cement
70	27	39	0	12
85	27	38	0	11
100	28	32	1	5

(주입 거리: 0cm). 그라우트가 필터재에 침투하지 못하고, 필터재의 중공(가운데 부분)에만 모여 양생된 것으로 관찰되었다. 모든 물-시멘트 비율(w/c)에서 동일한 현상이 나타나, 이는 입자 크기가 필터재의 간격보다 크다는 점이 주입 실패의 주요 원인을 시사한다.

MC는 w/c=70%에서 1.3cm의 주입되었으며, w/c=85%와 100%에서는 모두 1.6cm의 주입 거리를 보여 고점도 상태에서 침투 거리가 더 긴 것으로 분석되었다. 이는 육안 비교 시에도 명확하게 확인되었다.

주입 재료에 따른 주입 성능 비교에서 주입 면적율은 OPC에 비해 MC에서 현저히 높게 나타났다. 이는 입자 크기 분석 결과와 일치하며, MC의 입자 크기(4D95)가 132.04 $\mu$ m로 필터의 간극을 통과할 수 있어 더 높은 주입 가능성을 가지는 것으로 예측된다.

절단면 분석에서는 주입관이 들어가는 부분을 제외한 순면적율을 계산하여 주입 성능을 정량적으로 비교하였다. 이 분석 결과에서 OPC는 거의 주입되지 않았으며, MC는 모든 w/c에서 주입이 발생하였다. 특히 w/c=70%에서 가장 높은 순면적율을 보였다. 이러한 결과는 주입된 그라우트 재료의 입경과 물-시멘트비에 따라 달라지며, MC가 고점도 조건에서도 높은 주입 성능을 나타내는 것으로 해석될 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구는 대심도 조건에서의 고효율 그라우팅 기술 개발을 위한 주요 단계로서, Barton's Cubic Network 이론과 입자 크기 통과 분석 결과에 기반한 주입 모형 실험을 통해 대심도 조건에서의 그라우트 재료 주입 가능성을 종합적으로 검증하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 입자 크기 분석 실험 결과와 Barton's Cubic Network에 의해 예측된 대심도 주입 가능한 암반 절리 간격(138 $\mu$ m)을 기준으로 한 분석을 통해 OPC와 MC의 주입 가능성을 비교·분석하였다. 분석 결과, 이론적으로 OPC는 암반 절리 간격을 통과할 수 없을 것으로 보이며, MC는 통과

할 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 고효율 그라우트 재료로서의 MC와 같이 입자 크기가 작은 재료를 사용하는 것이 더 적합한 것을 간접적으로 확인하였다.

- (2) 모형 실험 장치를 활용하여 수행된 주입 실험에서 OPC는 입자 크기가 크기 때문에 필터재를 통과하지 못한 반면, MC는 다양한 물-시멘트비(w/c=70%, 85%, 100%)에서 상당한 침투 거리(최대 1.6cm 이상)를 보여주었다. 이는 MC의 고점도 상태에서도 우수한 침투력을 나타내며, 대심도 그라우팅 작업에 있어 효율적인 주입 재료로서의 가능성을 시사한다.
- (3) 'Image J' 프로그램을 활용한 그라우트재의 침투 양상 평가에서, 그라우트재가 차지하는 면적율이 OPC에 비해 MC에서 현저히 높게 나타났다. 이는 OPC의 입자 크기가 MC 비해 크고 필터를 통과하지 못한 반면, MC는 높은 순면적율을 보이며, 고점도 상태에서도 우수한 주입 성능을 나타냄을 보여준다.

종합적으로 고점도의 MC 재료가 대심도 암반 절리면 보강에 적합할 것으로 나타났으며, 고효율 그라우트 재료의 선택 및 적용이 대심도 암반 절리 간격에 효과적이며, 차수 및 보강 작업의 효율을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다. 이상의 연구 결과는 대심도 그라우팅 기술 개발에 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 예상되며, 대심도 그라우팅 작업의 설계 및 시공에 있어서 실질적인 가이드라인을 제공하며, 향후 관련 연구 및 기술 개발에 있어서 기초 자료로서의 역할을 할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의(도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: RS-2020-KA157786) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Barton, N., Buen, B. and Roald, S. (2001), Strengthening the case for grouting, T&t international, Vol. 33, No. 12, pp. 34~36.
2. Barton, N. (2004a), The Why's and how's of high pressure grouting-Part1, T&t international, Vol. 36, No. 9, pp. 28~30.
3. Barton, N. (2004b), The Why's and how's of high pressure grouting-Part2, T&t international, Vol. 36, No. 10, pp. 33~35.
4. Barton, N. and Quadros, E. (2019), Understanding the need for pre-injection from permeability measurements: What is the connection?, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 576~597.
5. Kim, J. M. and Lee, E. K. (2022), A fundamental study on the criteria of basic parameters for planning rock grouting, JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Vol. 38, No. 2, pp. 15~27 (In Korean).
6. Pettiaux, N., Cassart, M., Paiva, M. and Estenne, M. (1997), "Three-dimensional reconstruction of human diaphragm with the use of spiral computed tomography", J. Appl. Physiol., Vol. 82, No. 3, pp. 998~1002.
7. Rittweger, J., Michaelis, I., Giehl, M., Wüsecke, P. and Felsenberg, D. (2004), "Adjusting for the partial volume effect in cortical bone analyses of pQCT images", J. Musculoskelet Neuronal Interact, Vol. 4, No. 4, pp. 436~441.
8. Yoon, I. K., Moon, J. H., Lee, J. S. and Kim, Y. U. (2021), Characteristic of high-viscosity grouting materials for rock joint reinforcement of deep tunnel, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 22, No. 12, pp. 59~63 (In Korean).
9. Park, D. H. (2010), Environmentally Friendly Characteristics and Durability of Inorganic Reinforcement Materials, Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul (In Korean).