

도심지 지하 터널시공 중 차수·보강 그라우팅 공사의 품질향상을 위한 P~q~t charts 적용성 연구

김진춘¹ · 김석현² · 유병선^{3*} · 강희진⁴

¹(주)한국지오테크 대표이사, ²(주)한국지오테크 기술연구소 수석연구원, ³(주)한국지오테크 기술연구소 연구소장,

⁴(주)한국지오테크 기술연구소 전문위원

A Study on the P~q~t Charts Applicability for Quality Improvement of Water-Sealing&Reinforcement Grouting in Tunneling Work Underneath the City

Jin-Chun Kim¹, Seok-Hyun Kim², Byung-Sun Yoo^{3*}, and Hee-Jin Kang⁴

¹Ph.D., President, Hankook Geotechnology Inc.

²Chief Researcher of HK Research, Hankook Geotechnology Inc.

³Ph.D., Director of HK Research, Hankook Geotechnology Inc.

⁴Ph.D., Technical Expert of HK Research, Han kook Geotechnology Inc.

요약

본 연구는 도심지 지하 교통망 건설 중 터널굴착 공정에 적용하는 차수·보강 그라우팅 공사의 품질향상을 위한 것이다. 기존의 터널 그라우팅 시공에서는 실시간으로 주입압 및 주입량을 보여주는 P~q~t charts를 기술적으로 온전히 활용하지 못하였다. 그 이유는 주입 지반의 차이 및 주입 중 어떤 문제가 발생할 시에 P~q~t charts가 어떻게 변화하며, 그에 따른 표준적인 주입유형을 보여주는 주입 그래프 패턴, 특성, 판정, 그에 따른 조치유형 및 조치방법에 대한 기술적 판단방법이 없었기 때문이다. 본 논문은 상기의 문제점 등을 해결하기 위한 일환으로 일반 및 알고리즘 그라우팅 시 토사층 및 암반층으로 구분하여 주입유형, 특성, 판정방법, 그리고 조치유형 및 조치방법 등의 연구를 수행하였다. 새롭게 개선된 토사층 P~q~t charts에서는 일반그라우팅과 알고리즘 그라우팅 둘로 나누어 각각 6가지 유형으로 구분하였고 각 유형에 따른 특성 및 판정방법을 도출하였으며 일반주입유형과 알고리즘 주입유형에서의 각 유형별 조치방법도 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다. 또한, 개선된 암반층 P~q~t charts에서도 각각 6가지 유형으로 구분하여 토사층과 같이 해당 유형에 상응하는 조치방법을 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다. 따라서, 도심지 지하 교통망 건설 중 터널굴착 공정에 적용하는 차수·보강 그라우팅 공사에서 예비단계의 현장시험 혹은 시공 중 단계에서 시간에 따른 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t charts를 실시간 측정하여 주입유형을 분석하고 조치방법을 마련하여 더 나아가 모든 그라우팅 단계에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 지하 터널시공, 그라우팅, 압력-유량-시간 차트, 지층타입, 그라우팅유형

ABSTRACT

This study is for the quality improvement of water-sealing & reinforcement grouting in tunnel of the construction of the underground transportation network underneath the city. Existing tunnel grouting process did not technically utilize P~q~t charts fully. It is due to the absence of technical methods to decide how P~q~t charts change in the presence of trouble and what the change represents in grouting. There were no standards to decide which chart pattern represents which ground characteristics, how to categorize ground types, and how

*Corresponding author: Byung-Sun Yoo, Kig-2000@hanmail.net

Received: 20 August 2021, Revised: 12 September 2021, Accepted: 25 September 2021



to take measures according to the standards. This paper studies on the grouting type, ground characteristics, ground type categorizing method, and countermeasures for both general and algorithm-processed grouting in soil and rock layer to address the aforementioned problems. Newly improved P~q~t charts from grouting in soil was categorized into six different types. Different characteristics and categorization method was developed for each type. Countermeasures for each type of grouting process were developed so that on-site application can be readily available. Improved P~q~t charts for rock layer also have six different types of grouting. Each type was given the countermeasures for rock layer grouting process for easier applications. Therefore, it is expected to be used through out the entire process of grouting from preparation to the last report of the water-sealing & reinforcement grouting in tunnel of the construction of the underground transportation network underneath the city.

Keywords: Underground tunneling work, Grouting, P~q~t charts, Ground types, Grouting types

1. 서론

최근들어 국내 수도권을 중심으로 도심지의 상부교통망이 포화상태에 이르러 수도권 교통망을 빠르게 연결할 목적과 구 간별 상시교통지체를 해결할 목적으로 다양한 지하화 교통망 건설사업(GTX노선 건설 및 각종 지하화 교통망 건설 등)이 활발하게 추진되고 있고 도심지 지하화 교통망의 특성상 대부분 구간이 도심지 하부를 통과하는 터널로 계획되어 있다.

현재 터널 굴착공사 중 적용하는 보조공법인 차수·보강 그라우팅 기술은 1세대기술에서 4세대기술까지 현장에서 적용하고 있는데 1세대 기술은 국내·외 현장에서 대부분 사용하는 최대주입압력기준, 최소주입량기준 및 최대주입최적기준으로 설명 할 수 있다. 2세대 기술은 댐 그라우팅에 주로 사용하는 GIN-method(Lombardi, 2003)라 불리는 기술이며 3세대 기술은 시공 전·중 최적의 주입압·주입시간을 계산 할 수 있는 GT-method(Kalle, 2008)이며 4세대 기술은 이론적 모델기반 알고리즘 그라우팅이라 불리는 RCG method(Kobayash and Stille, 2008) 및 ROG method(Rafi, 2010)이다.

알고리즘 그라우팅이란 토사층(3D)에서는 구면침투모델(Kim, 2006)을 이용하고 암반층(1D, 2D)에서의 침투모델은 Kobayashi and Stille(2008)이 제안한 1D 및 2D 침투모델을 이용하고 실시간 예측주입량을 산정하여 실제 주입량과 동조화 시키며 주입 중 이상현상을 즉시 조치할 수 있는 최근에 개발된 그라우팅 방법이며 본 연구에서는 상기 예측침투모델(1D, 2D, 3D)들을 적용하였다.

그라우팅이란 유동하는 그라우팅 재료를 이용하여 주입압력을 가하여 지반 속으로 침투시켜 차수 및 보강하는 작업을 통칭한다. 일반적인 그라우팅 기술의 시공순서는 천공단계 - 그라우팅단계 - 주입효과시험단계 순서로 진행된다(Kim, 1999). 지금까지는 그라우팅 단계에서 롤 페이퍼 등에 잉크 등으로 기록되는 시간에 따른 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t charts(주입압(P)~주입량(q)~시간(t) 차트(charts))를 기술적으로 제대로 활용하지 못하였다. 그 이유는 주입지반의 차이 및 주입 중 어떤 문제가 발생 시에 P~q~t charts가 어떻게 변화하며, 그에 따른 표준적인 주입유형(주입 그래프 패턴), 특성, 판정, 조치 유형 및 조치방법에 대한 기술적 판단방법이 없었기 때문이다.

국내외 문헌조사에서는 Chun et al.(2008)이 제시한 P~q~t chart 적용연구는 토사층의 경우 일본의 Shimada et al.(1992)가 제시한 6가지 주입유형에 대한 적용연구이며 암반층의 경우 인도의 Mistry(1988)가 제시한 6가지 주입유형을 국내 실정에 맞도록 개선하여 적용한 연구로서 본 논문의 주입유형의 분석결과와 비교검토하기 위해 본 연구에 일부 활용하였다.

그 외 국내 문헌연구에서 다양한 분야의 연구자들이 P~q~t charts를 이용한 적용연구를 수행한 적이 있지만 모두 일반주입유형만 제시되어 있고 조치유형은 없으며, 특히, 4세대 기술인 실시간 주입량을 예측하여 시공하는 알고리즘 그라우팅에 대비한 기술이 아니다(Choi et al., 2020; Kim et al., 2020).

기존 개발된 기술 문헌조사에서도 그라우팅 분야의 현장시험들 대부분이 시추공 내에 주수관을 설치하고, 해당 시험구간을 펌프로 밀폐한 후 주수관을 통하여 소정의 압력으로 물을 주입하고 그 주입유량을 측정하여 데이터 값을 산출하는 현장시험장치가 다양하게 개발되어 있다. 일반적으로 이 기술들은 정해진 홀 길이, 일정시간 및 일정압력 조건에서 지반 속으로

들어간 물의 양을 측정하여 지반의 투수성 만 알고자 하는 현장시험방법으로만 이용된다.

본 연구의 주 목적은 예비단계의 현장시험 혹은 시공 단계에서 시간에 따른 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t charts를 실시간 측정하여 주입유형을 분석함에 있다. 또한 기존에 적용되는 주입분석 방식인 일반주입유형 및 조치방법에서 더 나아가 이론적 모델기반 실시간 예측유량을 산정하여 주입시공하는 알고리즘 주입유형 및 조치방법을 제시하여 시공 전, 시공 중 및 시공 후 등 모든 그라우팅 단계에서 기존의 자동주입 관리보다 더 정교하고 최적화 된 시공에 활용 할 수 있는 조치방안을 모색하는 데 그 목적이 있다.

2. 알고리즘 그라우팅(Algorithm Grouting)

2.1 토사층(3D) 알고리즘 그라우팅의 원리와 구현

토사층(3D) 알고리즘은 Fig. 1과 같이 구면침투모델(Kim, 2006)을 이용하여 점도변화와 동수경사변화에 의한 상관관계를 이용한다. 토사층(3D)과 같은 다차원 지반에서 그라우팅 주입량을 예측하기 위하여 실시간으로 주입량을 예측할 수 있는 제안 식은 다음 식 (1)과 같다.

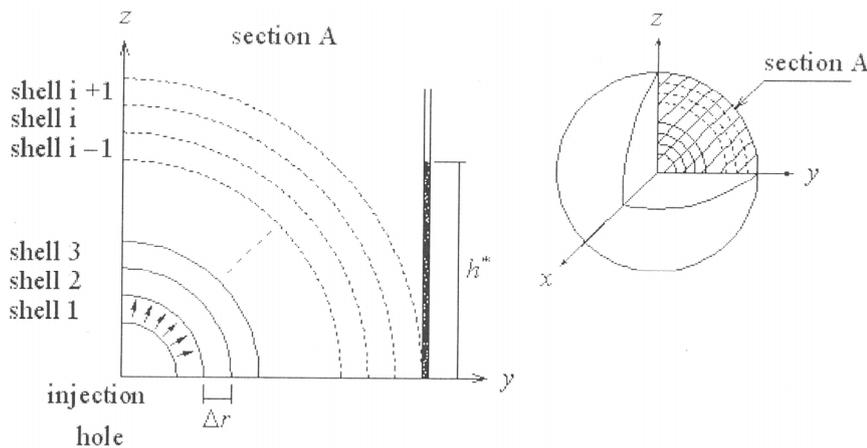


Fig. 1. The Spherical permeable model of soil (3D)

$$3D: \Delta q_i = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{4}{3} \pi [(r + \Delta r_i)^3 - r^3] \frac{1}{\Delta t} \cdot n_i \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \Delta r_i = \frac{\Delta t \cdot \gamma_g \cdot K_{int} \cdot \bar{i}}{\mu_g \cdot \left(\sum_0^{i-1} \Delta t_i \right)}$$

여기서, Δq_i 는 Δt_i 시간 동안의 주입량, Q 는 전체주입량, r 은 초기 천공시 구근의 반지름, Δr_i 은 i 시간 동안 증가되는 구근의 반지름, n_i 는 i 시간 동안 변하는 지반의 공극률, Δt_i 는 i 시간에서의 측정간격시간, γ_g 는 그라우트재의 단위중량, K_{int} 는 지반의 고유투수계수, \bar{i} 는 평균동수경사를 의미한다.

새로운 제안식에서는 Δt 는 일정하다고 가정하였는데 왜냐하면 현장에서 측정되는 데이터는 거의 1초단위로 측정되기 때문이다. 식 (1)에서 동수경사는 시간에 따라 변하는 데이터이므로 다음 식 (2)와 같이 개선하였다.

$$i = \frac{\Delta p - u}{\Delta r_i} \tag{2}$$

여기서, i 는 동수경사, Δp 는 주입압력, Δr_i 는 i 시간 동안 증가되는 구근의 반지름, u 는 지하수압력을 의미한다.

식(1)에서 점도의 변화를 나타내는 $\mu_g \cdot \left(\sum_0^{i-1} \Delta t_i\right)$ 는 그라우트재의 시간에 따른 점도 변화를 나타낸 것이다. 이는 실내 시험에서 측정된 점도값으로부터 Table 1과 같은 시간에 따른 점도함수($\mu(t)$)를 구하여 실시간 주입량예측을 위해 사용하였다.

Table 1. The viscosity function of grouting material with w/c ratio

W/C	2.0	1.0	0.8
Viscosity fun. ($\mu_g(t)$)	$0.0055 \times e^{0.00042t}$	$0.015 \times e^{0.00042t}$	$0.095 \times e^{0.00042t}$

2.2 암반층(1D, 2D) 알고리즘 그라우팅의 원리와 구현

암반층(1D, 2D) 알고리즘(Kobayashi and Stille, 2008; Rafi, 2010)의 1D의 경우는 Fig. 2의 암반층(1D) 예측주입 모델을 사용하고 1차원의 주입체적과 그라우트 흐름에 관한 상관관계는 다음 식 (3)~식 (5)과 같이 정의 할 수 있다.

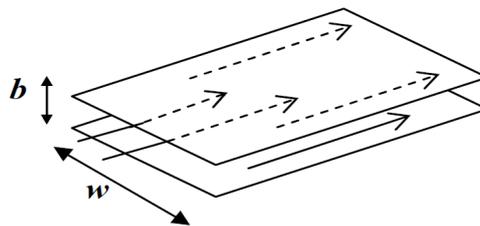


Fig. 2. The estimation model of rock (1D)

$$V = I \cdot w \cdot b = I_D \cdot I_{max} \cdot w \cdot b = I_D \cdot \left[\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right] \cdot w \cdot b^2 \tag{3}$$

여기서, V 는 주입체적, I 는 침투길이, I_D 는 상대적 침투길이, I_{max} 는 최대침투길이, w 는 절리의 폭, b 는 절리의 두께, Δp 는 주입압력, τ_0 는 재료의 초기 항복강도를 의미한다.

식(3)을 이용하여 식(4)에서 정리한 것과 같이 여러 개의 절리에 적용 할 수 있도록 계산 할 수 있는 식이다.

$$V_t = I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot \sum w \cdot b^2 \tag{4}$$

여기서, V_t 는 전체 주입체적, I_D 는 상대적 침투길이, Δp 는 주입압력, τ_0 는 재료의 초기 항복강도, w 는 절리의 폭, b 는 절리의 두께를 의미한다.

식(4)의 주입체적에 관한 식을 이용하여 1D의 예측유량을 계산할 수 있는 식을 유도한 것은 다음 식 (5)과 같다.

$$Q = \frac{dV_t}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot \sum w b^2 \tag{5}$$

여기서 Q 는 실시간 주입량, $\frac{dV_t}{dt}$ 는 전체주입체적의 시간에 따른 미분값, $\frac{dI_D}{dt_D}$ 는 상대적 침투길이의 시간에 따른 미분값, t_0 는 그라우팅 시간, Δp 는 주입압력, τ_0 는 재료의 초기 항복강도, w 는 절리의 폭, b 는 절리의 두께를 의미한다.

2D의 경우 간격 “b”에 따른 원형형태의 절리에 주입된 체적을 수식으로 나타내면 다음 식 (6)과 같으며 Fig. 3은 암반층 (2D) 예측주입 모델의 모식도이다.

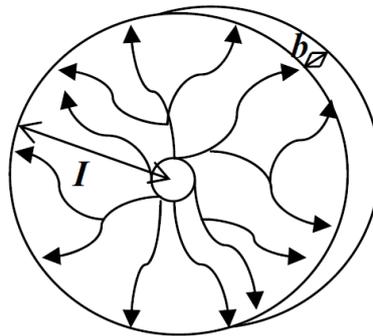


Fig. 3. The estimation model of rock (2D)

$$V = \pi \cdot I^2 \cdot b = \pi \cdot (I_D \cdot I_{max})^2 \cdot b = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left[\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right]^2 \cdot b^3 \tag{6}$$

여기서, V 는 주입체적, I 는 침투길이, b : 절리의 두께, I_D 는 상대적 침투길이, I_{max} 는 최대침투길이, Δp : 주입압력, τ_0 : 재료의 초기 항복강도를 의미한다.

식 (6)을 이용하여 여러 개의 절리들에 대한 주입체적을 계산하기 위한 수식을 나타낸 것은 다음 식 (7)과 같다.

$$V_t = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot \sum b^3 \tag{7}$$

여기서, V_t 는 전체 주입체적, I_D 는 상대적 침투길이, Δp : 주입압력, τ_0 : 재료의 초기 항복강도, b 는 절리의 두께를 의미한다.

식 (7)과 같이 전체 주입체적을 구하는 식을 이용하여 2D의 예측유량을 계산하는 방법을 유도한 것은 식 (8)과 같다.

$$Q = \frac{dV_t}{dt} = 2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot \sum b^3 \tag{8}$$

여기서 Q 는 실시간 주입량, $\frac{dV_t}{dt}$ 는 전체주입체적의 시간에 따른 미분값, I_D 는 상대적 침투길이, $\frac{dI_D}{dt_D}$ 는 상대적 침투길이의 시간에 따른 미분값, t_0 는 그라우팅 시간, Δp : 주입압력, τ_0 : 재료의 초기 항복강도, b 는 절리의 두께를 의미한다.

암반층(1D, 2D)와 같은 지반에서 그라우팅 주입량을 예측하기 위하여 실시간으로 주입량을 예측할 수 있는 식은 다음 1D의 경우 식 (9)와 2D의 경우 식 (10)과 같다.

$$1D: \Delta q_i = \frac{dV_t}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left[\frac{\Delta p}{2\tau_g \sum_0^{i-1} (\Delta t_i)} \right] \cdot \sum w b^2 \quad (9)$$

여기서 Δq_i 는 Δt_i 시간 동안의 주입량, $\frac{dV_t}{dt}$ 는 전체주입체적의 시간에 따른 미분값, $\frac{dI_D}{dt_D}$ 는 상대적침투길이의 미분값, t_0 는 그라우팅 시간, Δp 는 주입압력, τ_g 는 그라우트의 항복강도, w 는 절리의 폭, b 는 절리의 두께를 의미한다.

$$2D: \Delta q_i = \frac{dV_t}{dt} = 2\pi I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left[\frac{\Delta p}{2\tau_g \sum_0^{i-1} (\Delta t_i)} \right] \cdot \sum b^3 \quad (10)$$

여기서 Δq_i 는 Δt_i 시간 동안의 주입량, $\frac{dV_t}{dt}$ 는 전체주입체적의 시간에 따른 미분값, I_D 는 상대적 침투길이, $\frac{dI_D}{dt_D}$ 는 상대적침투길이의 미분값, t_0 는 그라우팅 시간, Δp 는 주입압력, τ_g 는 그라우트의 항복강도, b : 절리의 두께를 의미한다.

Table 2. The yield strength function of grouting material with w/c ratio

W/C	2.0	1.0	0.8
Yield strength fun. ($\tau_g(t)$)	$0.259 \times e^{0.00039t}$	$1.49 \times e^{0.00038t}$	$10.2 \times e^{0.00037t}$

새로운 제안 식에서는 Δt 는 일정하다고 가정하였는데 왜냐하면 현장에서 측정되는 데이터는 거의 1초 단위로 측정되기 때문이다. 식 (9) 및 식 (10)에서 재료의 항복강도의 변화를 나타내는 $\tau_g \cdot \left(\sum_0^{i-1} \Delta t_i \right)$ 는 그라우트재의 시간에 따른 항복강도 변화를 나타낸 것이다. 이는 실내시험에서 측정된 항복강도 값으로부터 Table 2와 같은 시간에 따른 항복강도 함수($\tau_g(t)$)를 구하여 실시간 주입량 예측을 위해 사용하였다.

3. 연구의 방법과 연구절차

3.1 연구방법

본 연구는 도심지 지하 교통망 건설 중 터널굴착 공정에 적용하는 차수 보강 그라우팅 공사의 품질향상을 위한 것으로서, 그라우팅 과정에서 시간에 따른 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t charts를 활용하여 분석 및 결과를 도출하였다. 따라서, 국내 그라우팅 전문업체인 A社의 자동화 그라우팅 장비로부터 측정 및 저장된 그라우팅 시공현장 데이터와 보고서자료 등을 이용하여 그 주입유형을 분석 및 분류하고 현장조사시험 등을 통하여 조치방법 등을 제안하는 방법을 채택하였으며, 우선적으로, 각종 터널건설 현장자료를 최대한 활용하였다. Table 3은 A社의 2008년~2020년까지 그라우팅 시공현장자료를 분류한 것이다.

Table 3. Classification of grouting data from HK Geotechnology Inc.

Classification	Soil Sites	Rock Sites	Sum
Expressway	12	12	24
Seoul City	15	4	19
Gyeong-Gi Area	20	9	29
MOLIT	7	7	14
All local government	15	15	30
Railroad	13	12	25
Subway	6	5	11
Reservoir and Dam	18	18	36
Etc.	22	22	44
Total	128	104	232

3.2 연구절차

본 연구의 시험절차는 Fig. 4과 같이 ① 일반 그라우팅 및 알고리즘 그라우팅 현장자료를 우선 구분한다. ② 대상 자료가 토사층 현장 인지 암반층 현장인지 구분한다. ③ 각 현장에서 측정된 P~q~t charts를 스텝별로 분석하여 그라우팅 현장에서 나올 수 있는 모든 유형을 분류한다. ④ 각 패턴에 따른 현장조사자료 및 그라우팅 시공자료를 매칭하여 주입유형, 특성 및 판정 방법을 확정한다. ⑤ 주입 전·중·후의 현장조사자료, 시공자료 및 주입효과 확인시험 등의 자료를 통해 각 패턴의 문제점에 따른 조치유형 및 조치방법을 결정한다. ⑥ 최종 토사층 6가지 및 암반층 6가지의 주입유형 및 조치방안을 확정한다. 왜냐하면 기존 연구자들의 오랜 연구결과들과 본 연구에서의 현장자료를 분석 및 매칭한 결과 최종적으로 토사층 6가지 및 암반층 6가지로 분류하는 것이 적합하다고 판단하였다(Chun et al., 2008; Choi et al., 2020; Kim et al., 2020).

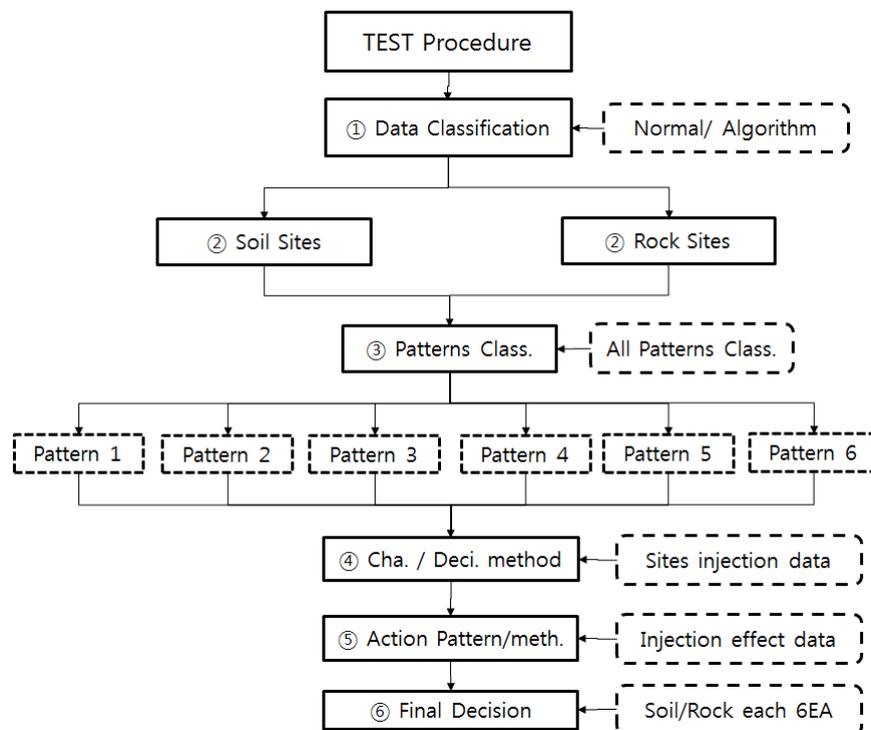


Fig. 4. The test procedure for this study

4. 시험결과 및 분석

본 논문에서의 분석결과는 토사층에서는 일반 그라우팅 및 알고리즘 그라우팅으로 구분하여 총 6가지 유형(A형, B형, C형, D형, E형, F형) 중 토사층에서 대표성을 띠는 2가지 유형 즉 C형 및 E형의 각 유형에 따른 유형특성 및 유형판정방법과 일반주입유형에서는 C-X형 및 E-X형의 각 조치유형 및 조치방안을 알고리즘 주입유형에서는 C-AIX형 및 E-AIX형의 각 조치유형 및 조치방안을 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다.

암반층에서도 일반그라우팅 및 알고리즘 그라우팅으로 구분하여 총 6가지 유형(A1형, A2형, B1형, B2형, C1형, C2형) 중 암반층에서 대표성을 띠는 2가지 유형 즉, A1형 및 C1형의 각 유형에 따른 유형특성 및 유형판정방법과 일반주입유형에서는 A1-X형 및 C1-X형의 각 조치유형 및 조치방안을 알고리즘 주입유형에서는 A1-AIX형 및 C1-AIX형의 각 조치유형 및 조치방안을 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다.

4.1 토사층 C형

토사층 C형의 경우 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 일반 및 알고리즘 그라우팅의 주입유형특성은 “주입압이 전혀 상승하지 않거나 오히려 하강함”을 보이는 경우이며 현장지반의 공학적 흡의 분류방법에 의하면 SP, SM, SC, ML 및 CL 계열의 흙까지 해당되며 투수계수는 $a \times 10^{-3} \sim 10^{-5}$ cm/sec 이내의 범위이다.

유형판정은 점성토에서 맥상으로 주입되면서 주입재가 광범위하게 유출되고 있는 경우이거나 주입재가 지표로 유출되는 경우이거나 지표근처의 공극으로 유출되는 경우이거나 지하매설물 내로 유출되는 경우이거나 희석이나 그 밖의 원인으로 주입재가 충분히 질화되지 않고 넓게 확산되는 경우이다(Chun et al., 2008).

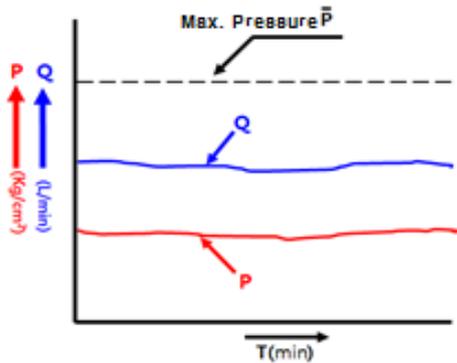


Fig. 5. C Pattern (Normal)

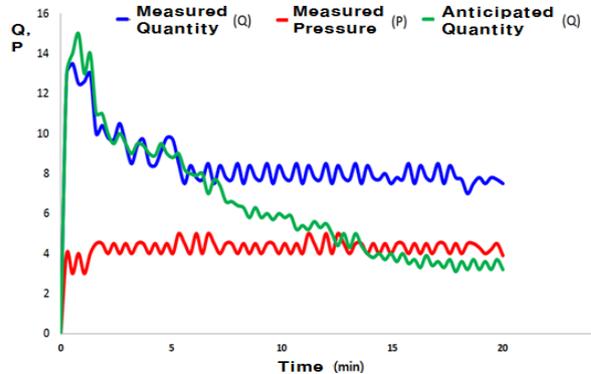


Fig. 6. C Pattern (Algorithm)

토사층 C형의 경우는 주입압이 전혀 상승하지 않거나 오히려 하강하는 경우이므로 주입재의 유출이 의심되는 경우로 W/C 70~80% 부배합(Rich mix)으로 조정하거나 겔타임(gel-time)을 초급결(3~5초)로 조정해야한다.

일반그라우팅은 최종 C-X형으로 주입 완료(Fig. 7 참조)하고 알고리즘 그라우팅은 최종 C-AIX형으로 주입완료 해야 한다(Fig. 8 참조). C-X형의 적용시점은 설계주입량 대비 70~80%인 시점에 적용한다. C형의 경우 주입 후 70~80% 이전 시점에는 주입유형을 판별하고 조치할 정도의 자료로서 불충분하기 때문이다. 추후 연구를 통해 조치적용 시점을 개선할 계획이다.

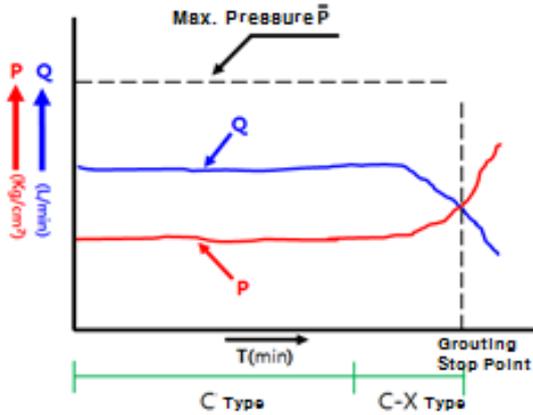


Fig. 7. C-X Pattern (Normal)

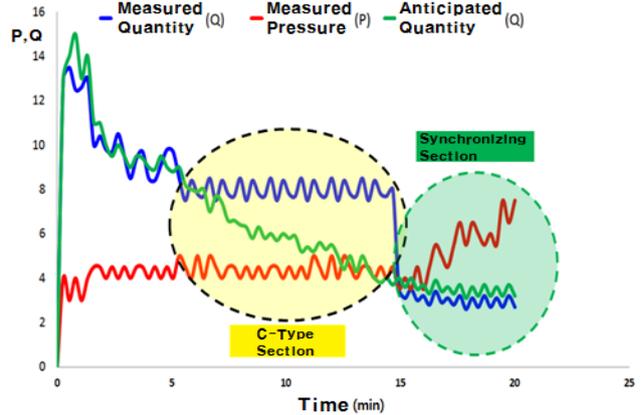


Fig. 8. C-AIX Pattern (Algorithm)

4.2 토사층 E형

토사층 E형의 경우 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 일반 및 알고리즘 그라우팅의 주입유형특성은 “D형 상승하강 패턴을 반복하며 주입압이 상승해감”을 보이는 경우이며 현장지반의 공학적 흙의 분류방법에 의하면 SP, SM, SC 및 ML 계열의 흙까지 해당되며 투수계수는 $a \times 10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec 이내의 범위이다.

유형판정은 주입시간에 비해 겔타임(gel-time)이 짧은 경우이거나 먼저 주입되어 겔화한 주입재가 후에 주입된 주입재에 의해 순차적으로 할렬파괴되면서 침투하는 경우로서 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있는 경우이다(Chun et al., 2008).

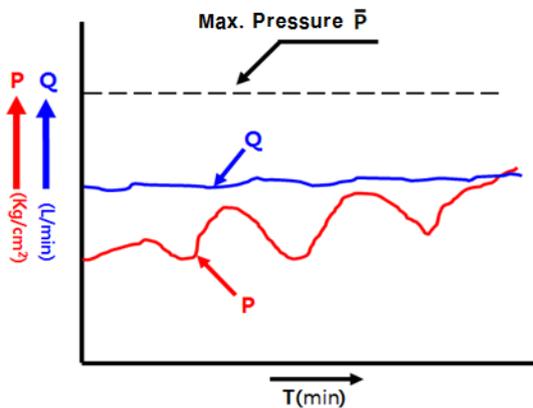


Fig. 9. E Pattern (Normal)

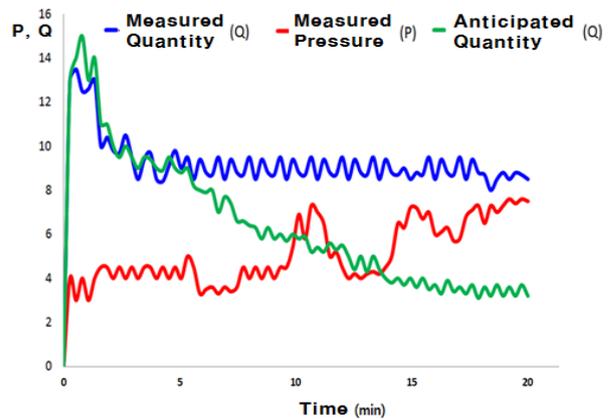


Fig. 10. E Pattern (Algorithm)

토사층 E형의 경우는 D형 상승하강 패턴을 반복하며 주입압이 상승해가는 경우이므로 압력은 점진적으로 상승하지만 주입량이 감소되지 않아 W/C 70~80% 부배합(Rich mix)으로 조정하거나 겔타임(gel-time)을 초급결(3~5초)로 조정해야 한다.

일반그라우팅은 최종 E-X형으로 주입 완료(Fig. 11 참조)하고 알고리즘 그라우팅은 최종 E-AIX형으로 주입완료 해야 한다(Fig. 12 참조). E-X형의 적용시점은 설계주입량 대비 60~70%인 시점에 적용한다. E형의 경우 주입 후 60~70% 이전 시점에는 주입유형을 판별하고 조치할 정도의 자료로서 불충분하기 때문이다. 추후 연구를 통해 조치적용 시점을 개선할 계획이다.

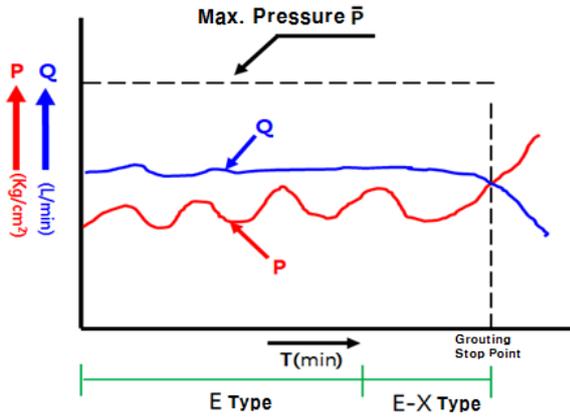


Fig. 11. E-X Pattern (Normal)

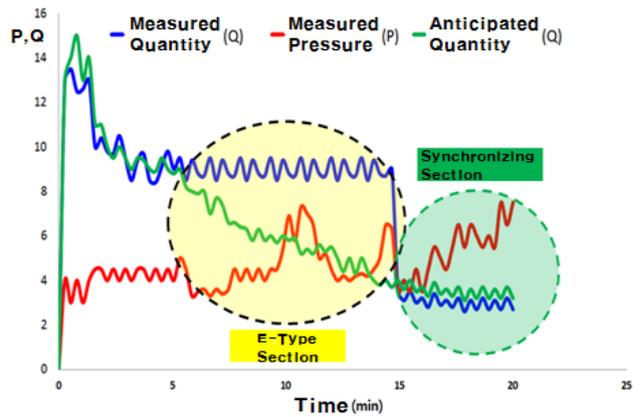


Fig. 12. E-AIX Pattern (Algorithm)

4.3 암반층 A1형

암반층 A1형의 경우 Fig. 13 및 Fig. 14과 같이 일반 및 알고리즘 그래우팅의 주입유형특성은“최고압력에 도달한 후 주입 압은 균일하게 유지되면서 주입속도는 감소함”을 보이는 경우이며 현장지반의 암반 분류기준에 의하면 심한 균열 (Fractured)의 풍화암~연암 정도에 해당되며 투수계수는 $a \times 10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec 이내의 범위이다.

유형판정은 균열이 주입재로 채워지면서 최고의 압력에 도달한 후에도 수개의 미세한 균열이 발생되고 다시 이들 틈새가 채워지는 경우이다(Chun et al., 2008).

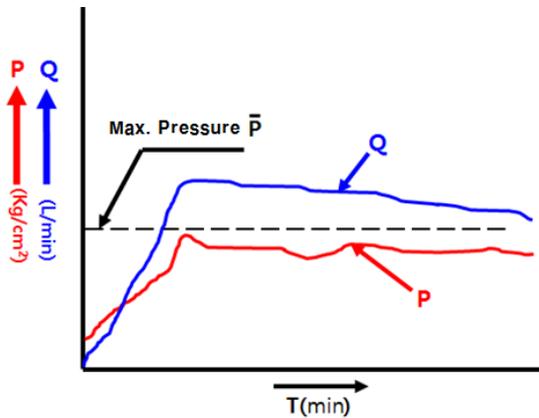


Fig. 13. A1 Pattern (Normal)

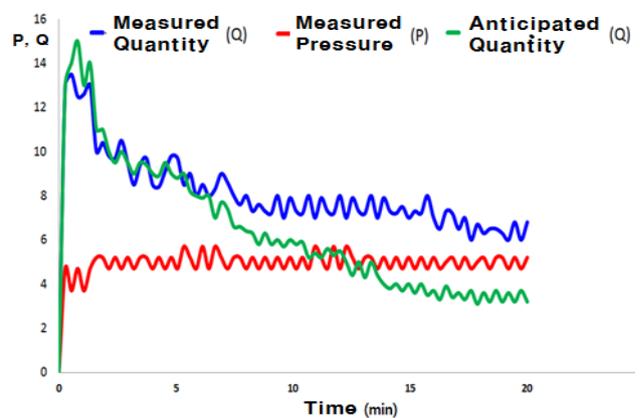


Fig. 14. A1 Pattern (Algorithm)

암반층 A1형의 경우는 최고압력에 도달한 후 주입압은 균일하게 유지되면서 주입속도는 감소하는 경우이므로 가장 이상적인 암반 주입형태로 거부반응(refusal)이 일어날 때까지 정압주입을 계속해야 하며 분말도를 6,000~8,000 cm²/g 로 조정하거나 W/C 120~150% 빈배합(Poor mix)으로 조정하거나 젤 타임(gel-time)을 급결(9~12초)로 조정해야 한다.

일반그라우팅은 최종 A1-X형으로 주입 완료(Fig. 15 참조)하고 예측 그라우팅은 최종 A1-AIX형으로 주입완료 해야 한다(Fig. 16 참조). A1-X형의 적용시점은 설계주입량 대비 50~60%인 시점에 적용한다. A1형의 경우 주입 후 50~60% 이전 시점에는 주입유형을 판별하고 조치할 정도의 자료로서 불충분하기 때문이다. 추후 연구를 통해 조치적용 시점을 개선할 계획이다.

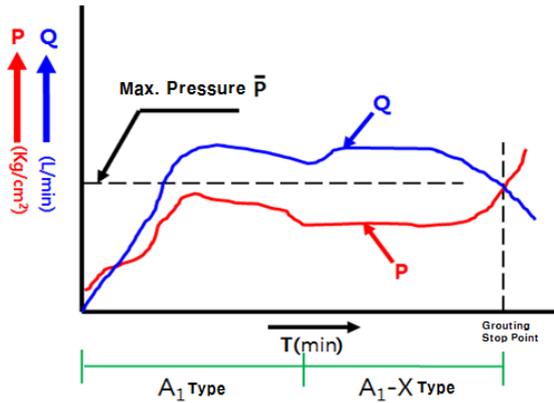


Fig. 15. A1-X Pattern (Normal)

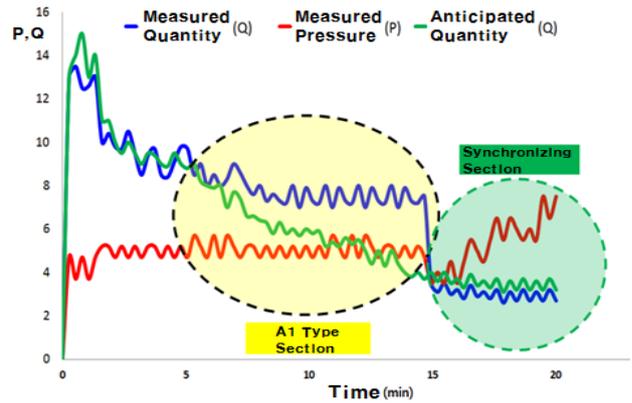


Fig. 16. A1-AIX Pattern (Algorithm)

4.4 암반층 C1형

암반층 C1형의 경우 Fig. 17 및 Fig. 18와 같이 일반 및 알고리즘 그라우팅의 주입유형특성은 “주입압이 어느 정도 올라간 후에 변함없이 일정수준을 유지하지만 주입속도는 계속 상승함”을 보이는 경우이다.

현장지반의 암반 분류기준에 의하면 매우 심한 균열(Highly Fractured)의 풍화암 정도에 해당되며 투수계수는 $a \times 10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 까지 범위이며 유형판정은 구조대 층리를 따른 누출, 주입공 상부 또는 연결공간의 누출 및 지층압괴가 용기되는 등의 경우이다(Chun et al., 2008).

암반층 C1형의 경우는 주입압이 어느 정도 올라간 후에 변함없이 일정수준을 유지하지만 주입속도는 계속 상승하는 경우 이므로 누출이 확인되거나 주입구간 m당 75 kg 이상 주입되면 주입을 중단하고 48시간 지난 후 재천공 및 재주입해야 한다.

누출공은 썬기 등을 박아 탈출을 방지하고 누출공 인접 미주입공은 즉시 공내 세척을 실시하여 본 주입 이전에 폐색되는 것을 방지해야 한다.

지반응기 현상이 발견되면 주입을 즉시 중단해야 하며 분말도를 $3,500 \sim 3,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 조정하거나 W/C 60~70% 부배합 (Rich mix)으로 조정하거나 젤타임(gel-time)을 초급결(3~5초)로 조정해야 한다.

일반그라우팅은 최종 C1-X형으로 주입 완료(Fig. 19 참조) 하고 알고리즘 그라우팅은 최종 C1-AIX형으로 주입완료 해야 한다(Fig. 20 참조). C1-X형의 적용시점은 설계주입량 대비 50~60%인 시점에 적용한다. C1형의 경우 주입 후 50~60% 이전 시점에는 주입유형을 판별하고 조치할 정도의 자료로서 불충분하기 때문이다. 추후 연구를 통해 조치적용 시점을 개선 할 계획이다.

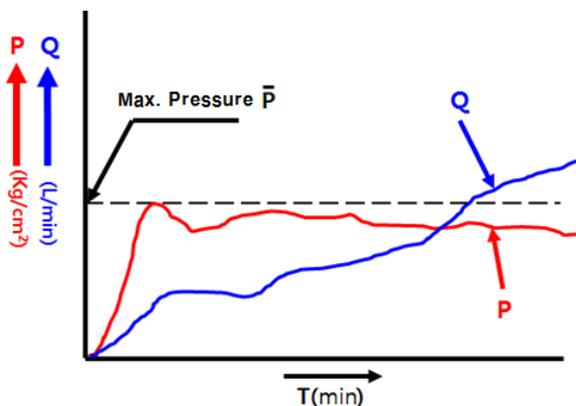


Fig. 17. C1 Pattern (Normal)

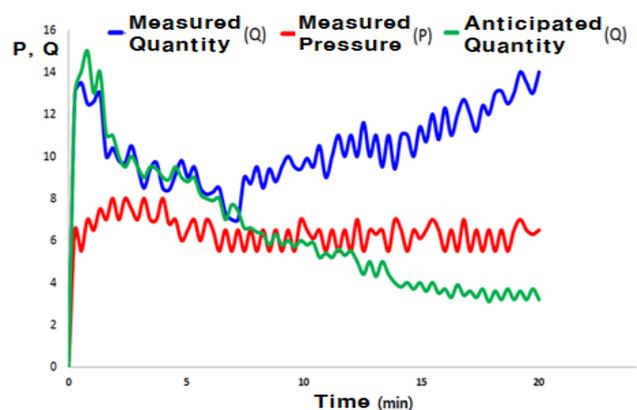


Fig. 18. C1 Pattern (Algorithm)

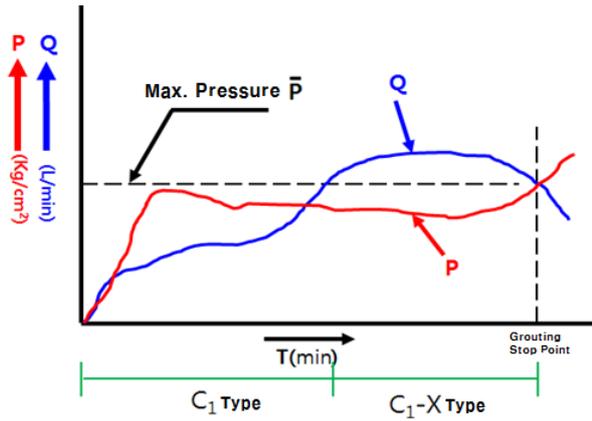


Fig. 19. C1-X Pattern (Normal)

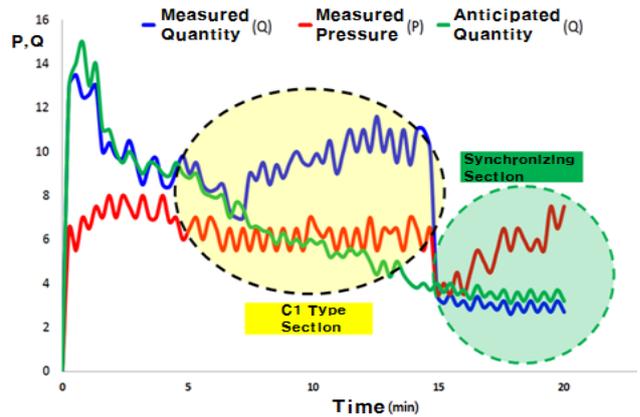


Fig. 20. C1-AIX Pattern (Algorithm)

5. 결론

본 논문은 도심지 지하 교통망 건설 중 터널굴착 공정의 보조공법으로 적용하는 차수·보강 그라우팅 공사의 품질향상을 위한 연구로서, 그라우팅에서 반드시 기록되는 P~q~t charts의 주입유형 및 조치방법 등을 새롭게 개선하여 실무에서 손쉽게 활용하기 위한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 토사층에서는 일반 그라우팅 및 알고리즘 그라우팅으로 구분하여 총 6가지 유형(A형, B형, C형, D형, E형, F형) 중 토사층에서 대표성을 띠는 2가지 유형 즉 C형 및 E형의 각 유형에 따른 유형특성 및 유형판정방법과 일반주입유형에서는 C-X형 및 E-X형의 각 조치유형 및 조치방안을 알고리즘 주입유형에서는 C-AIX형 및 E-AIX형의 각 조치유형 및 조치방안을 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다.
- 2) 암반층에서도 일반그라우팅 및 알고리즘 그라우팅으로 구분하여 총 6가지 유형(A1형, A2형, B1형, B2형, C1형, C2형) 중 암반층에서 대표성을 띠는 2가지 유형 즉, A1형 및 C1형의 각 유형에 따른 유형특성 및 유형판정방법과 일반주입유형에서는 A1-X형 및 C1-X형의 각 조치유형 및 조치방안을 알고리즘 주입유형에서는 A1-AIX형 및 C1-AIX형의 각 조치유형 및 조치방안을 개발하여 현장에서 쉽게 적용 가능하도록 제안하였다.
- 3) 따라서, 본 연구는 도심지 지하 교통망 건설 중 터널굴착 공정의 보조공법으로 적용하는 그라우팅 공사에서 예비단계의 현장시험 혹은 시공 중 단계에서 시간에 따른 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t charts를 실시간 측정하여 주입유형을 분석하고 조치방법을 마련하여 모든 그라우팅 단계(시공 전, 시공 중 및 시공 후 피드백 자료 등)에서 활용 할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment

본 연구는 국토교통부/ 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20UUTI-B157786-01).

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant, 20UUTI-B157786-01).

References

Choi, G. S., Kim, S. H., and Kim, N. S. (2020). Applications of Improved Low-Flow Mortar Type Grouting Method for

- Road Safety and Constructability in Dangerous Steep Slopes. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 40(4): 409-415. <https://doi.org/10.12652/ksce.2020.40.4.0409>
- Chun, B. S., Choi, D. C., and Kim, J. C. (2008). An Experimental Study on the Improving Reliability of Grouting by Using P-q-t Chart Analyzing Technique. *J. of Korean Tunnelling Underground Space Association*. 10(4): 383-395.
- Rafi, J. Y. (2010). Realtime Grouting Control Method. *Sedimentary Rock with Gotvand Dam Data*. pp. 33-37.
- Kalle, H. (2008). R20 Programme: The Development of Grouting Technique – Stop Criteria and Field Tests. Working Report 2007-101. Olkiluoto: POSIVA OY.
- Kim, J. C. (1999). A Study on the Injection Properties of Ultrafine Cement Grouting Materials. unpublished Doctoral Dissertation. Hanyang University. Seoul. Korea.
- Kim, J. S. (2006). Effect of Viscosity and Clogging on Grout Penetration Characteristics. unpublished Master's thesis. Korea University. Seoul. Korea.
- Kim, N. S., Choi, G. S., and Kim, S. H. (2020). Applicability Analysis of an Improved Multistep Steel Pipe Grouting Method in Shallow Depth Railway Tunnels in Considering Safety and Constructability. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 40(1): 97-103. <https://doi.org/10.12652/ksce.2020.40.1.0097>
- Kobayashi, S. and Stille, H. (2008). Realtime Grouting Method. Development and Application Using ASPO HRL Data. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Lombardi, G. (2003). Grouting of Rock Masses. Lombardi SA Engineering Limited. Minusio. Switzerland.
- Mistry, J. F. (1988). Important Aspects of River Valley Projects. Mahajan Book Distributors. Vol. 2. Amdavad. India.
- Shimada, T. and Cum, S. Y. (1992). The Latest Grouting Material Injection Method. Tokyo: Rikoh Tosho.

Korean References Translated from the English

- 김낙석, 최기성, 김석현 (2020). 저토피 철도터널구간의 안전 및 시공성을 고려한 개선된 강관다단 그라우팅 공법 적용성 분석. *대한토목학회논문집*. 40(1): 97-103.
- 김종선 (2006). 점도 변화와 폐색현상을 고려한 그라우트재의 침투 특성. 고려대학교 석사학위 논문.
- 김진춘 (1999). 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구. 한양대학교 박사학위 논문.
- 천병식, 최동찬, 김진춘 (2008). P~q~t chart 분석기법을 이용한 그라우팅 신뢰성 향상 방안에 관한 실험적 연구. *한국터널지하공간학회논문집*. 10(4): 383-396.
- 최기성, 김석현, 김낙석 (2020). 급경사지 붕괴 위험지역의 도로 안전 및 시공성을 고려한 개선된 저유동 몰탈형 그라우팅공법 적용성 분석, *대한토목학회논문집*. 40(4): 409-415.