

저토피 철도터널구간의 안전 및 시공성을 고려한 개선된 강관다단 그라우팅 공법 적용성 분석

김낙석* · 최기성** · 김석현***

Kim, Nakseok*, Choi, Gisung**, Kim, Seokhyun***

Applicability Analysis of an Improved Multistep Steel Pipe Grouting Method in Shallow Depth Railway Tunnels in Considering Safety and Constructability

ABSTRACT

The newly improved multistep steel pipe grouting method was applied to an existing steel pipe-reinforced grouting method. It was applied in order to prevent a damage caused by ground failure from excessive grouting pressure in a tunnel construction. The tunnel goes under a highway and a ramp connected to a rest area on OO highway with 11.3~12.1 m depth cover and is a part of roadbed facility construction section ordered by OO public corporation. The improved grouting method provides pre-construction work condition assessment technique through new water injection limit test and grouting effect assessment technique by grouting type assessment. It also includes assessments on interval of joints, appropriate grouting pressure, and optimal operation time to be applied to current operations. Application of the grouting method allowed the smooth road management in shallow-depth grouting construction area located upper part of tunnel excavation. Moreover, the possibility of the application of the method not only to shallow-depth grouting construction but also to various steel pipe-reinforced grouting constructions was confirmed.

Key words : Shallow depth, Railway tunnel, Steel pipe multistep grouting, Applicability analysis

초록

저토피 철도터널구간의 안전 및 시공성을 고려한 굴착보조공법으로서 강관다단 그라우팅 기술이 선정되었다. 특히, 공사 중 과도한 주입압에 의한 지반파괴로 피해가 발생할 우려가 있어 기존 강관다단 그라우팅 공법을 새롭게 개선하여 적용하였다. 본 연구는 OO공단에서 발주한 OO노반 시설 기타공사 구간 중 OO안 고속도로 및 OO휴게소(하행) 진입로 하부로 통과하는 토피고 11.3~12.1 m 두께의 저토피 철도터널 현장에서 수행하였다. 개선된 강관다단 그라우팅 공법은 새로운 한계주수시험법을 이용한 시공 전 시공조건 평가 기술, 질리의 간격평가, 적합한 주입압력 평가, 최적의 작업완료시간 평가, 주입유형분석에 의한 주입효과평가 기술 등이다. 개선된 강관다단 그라우팅 공법의 적용으로 터널굴착공사 중 상부 저토피 구간의 도로를 원활하게 운영할 수 있는 근거를 마련할 수 있었다. 또한, 향후 저토피 구간의 터널강관다단 그라우팅 공사뿐만 아니라 다양한 터널(도로, 지하철, 공동구 등) 강관다단 그라우팅 공사에 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

검색어 : 저 토피 지층, 철도터널, 강관다단 그라우팅, 적용성 분석

* 종신회원 · 경기대학교 토목공학과 교수 (Kyonggi University · nskim1@kyonggi.ac.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 경기대학교 소방·도시방재학과 박사과정 (Corresponding Author · Kyonggi University · 1982gisung@hanmail.net)

*** 종신회원 · 경기대학교 소방·도시방재학과 석사과정 (Kyonggi University · chrisk83@naver.com)

Received August 5, 2019/ revised September 3, 2019/ accepted December 10, 2019

1. 서론

일반적으로 강관다단 그라우팅 기술은 연약한 지반이나 터널 굴착면의 안정 및 붕괴방지를 위해 강관 삽입 및 그라우팅에 의한 구조적 보강으로 터널의 안정성을 확보하는 기술이다(Korea Rail Network Authority, 2018a). 이러한 우수한 터널보조공법이지만, 00공단에서 발주한 000노반시설 기타공사 구간 중 00안 고속도로 및 00휴게소(하행)진입로 하부로 통과하는 구간은 토피고 11.3~12.1 m 두께의 저토포 철도터널구간으로서 굴착공사에서는 상당한 주의가 필요하다. 따라서, 본 연구는 가장 우선적으로 문제가 될 수 있는 공사 중 과도한 주입압에 의한 지반 파괴로 피해가 발생할 우려가 있어 기존 강관다단 그라우팅 기술에서 적합하게 추가하여 적용할 수 있는 Fig. 1과 같이 개선된 강관다단 그라우팅 공법을 개발하였다. 개선한 강관다단 그라우팅공법은 기존 공정(코킹, 실링, 주입)에 추가하여 Fig. 2와 같이 새로운 한계주수시험법을 이용한 주입시공 전 시공조건 평가 기술, 적합한 주입재료의 선정을 위한 절리(공극, 틈)간격평가, 지반피해를 막을 수 있는 적합한 주입압력 평가, 전체공정을 단축 할 수 있는 최적의 작업완료시간 평가 및 특히, 국내에서는 아직까지 미흡한 요소분야기술인 주입유형분석에 따른



Fig. 1. Illustration of Improved Steel Pipe Multistep Grouting Method

- 1. New Water Injection Limit Test
- 2. Fracture Aperture Assessment
- 3. Suitable Pressure Assessment
- caulking, sealing, grouting procedure is the same as existing steel pipe multistep grouting method
- 4. Completion Time Assessment
- 5. Grouting Effect Analysis

Fig. 2. Improved Steel Pipe Multistep Grouting Method Composition

주입효과평가 기술 등이다. 개선된 강관다단 그라우팅 공법의 현장 적용성 연구를 통해 저토포 터널굴착공사 뿐만 아니라 강관다단 그라우팅 공법이 적용되는 모든 터널굴착공사에 확대적용 할 수 있는 기틀을 마련하고자 한다.

2. 개선된 강관다단 그라우팅 공법

2.1 New 한계주수시험

New 한계주수시험은 터널의 연약대층 혹은 토사층 등에 실시하여 주입지반의 시공조건을 평가하는 방법이다. 새롭게 제안된 한계 주수시험의 분석방법은 Fig. 3과 같이 시험결과를 이용하여 완전침투영역, 침투영역 및 할렬침투영역을 명확히 구분 할 수 있어 기존 시험방법보다 더욱 정확하고 안정적으로 각 시험결과 영역에서의 한계주입압 및 한계주입율을 결정 할 수 있는 최신 시험방법이다 (Japan Grouting Association, 2012). Fig. 4는 새로운 분석기법을 도입한 한계주수시험을 할 수 있는 프로그램 구현화면이다.

2.2 절리(공극, 틈)의 간격평가

절리(공극, 틈)의 수리적 간격평가는 아래 Eq. (1)을 이용하여 평가할 수 있다(Eloranta, 2007). 절리(공극, 틈)의 간격 평가결과는 주입재료의 선정방법에 사용된다.

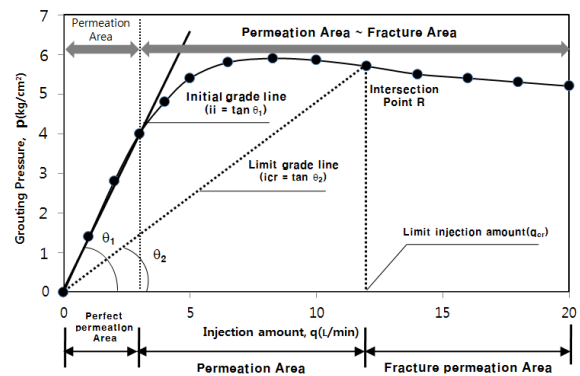


Fig. 3. Analysis Method of the New Water Injection Limit Test

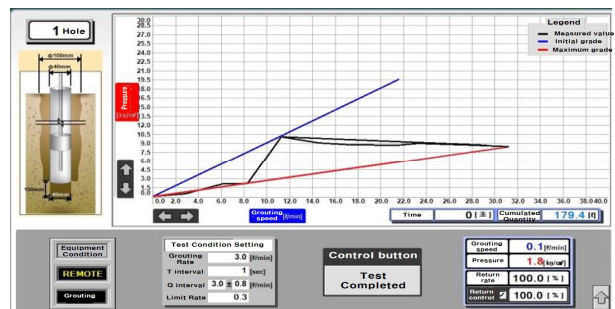


Fig. 4. New Water Injection Limit Test Program

$$b_{hydr} = \sqrt[3]{\frac{12T\eta_w}{\rho_w g}} \quad (1)$$

여기서, b_{hydr} 는 절리(공극, 틈)의 수리적 간격(m), T 는 침투계수(m^2/s), g 는 중력 가속도(m/s^2), η_w 는 물의 동 점성(Pas), ρ_w 는 물의 밀도(kg/m^3)를 나타낸다.

2.3 주입재료의 선정방법

시멘트재료의 평균입경분포크기(d_{50})는 상기 Eq. (1)을 이용하여 평가한 절리(공극, 틈)간격 평가값(b_{hydr})보다 3배정도 적어야 한다(Tolppanen and Syrjanen, 2003; Kim and Yoo, 2018). 또한, Eq. (2)의 나눗수는 다양한 영향인자의 수에 따라 변할 수 있으며 그 값은 2~16까지 폭넓게 변경될 수 있다고 보고 하였다.

$$d_{50} \leq \frac{b_{hydr}}{3} \quad (2)$$

2.4 그라우팅 압력 평가

그라우팅 압력(p_g)은 아래 Eq. (3)에 의해 평가 할 수 있다(Houlsby, 1990). Eq. (3)에서 평가된 최적의 주입압력은 앞 절 2.1의 new 한계주수시험방법에서 결정된 한계주입압력과 비교하여 서로 Cross Check 할 수 있다.

$$p_g \leq 3\rho_r gH - 2p_w \quad (3)$$

여기서, p_g 는 그라우팅 압력(Pa), p_w 는 지하수위 압력(Pa), ρ_r 는 지반의 밀도(kg/m^3), g 는 중력 가속도(m/s^2), H 는 지표면아래로의 깊이(m)를 나타낸다.

2.5 그라우트의 항복강도 평가

작업완료시간을 평가하기 위해 우선적으로 필요한 것은 그라우트의 항복강도이며 이는 아래 Eq. (4)로 평가 할 수 있다. Eq. (4)는 최초 Axelsson(2006)에 의해 제안되었으며 이후 Kim and Yoo(2018)에 의해 강관다단 그라우팅 시공 시 한 막장의 작업완료 시간을 평가 할 수 있도록 개선하였다.

$$\tau_{phr} \geq \frac{p_{hr} R_b}{2l_b} \quad (4)$$

여기서, τ_{phr} 는 그라우트의 항복강도(Pa), p_{hr} 는 호모겔의 저항압력(Pa, 호모겔의 저항압력: 2 MPa 이상; Korea Rail Network Authority, 2018b), l_b 는 천공홀의 길이(m), R_b 는 천공홀의 반경(m)을 나타낸다.

2.6 주입유형 분석 및 평가

지금까지는 주입 중에 반드시 기록되는 주입압 및 주입량의 데이터인 P~q~t chart(주입압 및 주입량의 시간경과 변화)가 효율적으로 이용되지 않았다. 이것은 지반 및 주입조건에 차이에 의해서 P~q~t chart가 어떻게 변화하는가에 대하여 정립된 기술적 판단이 요구되지 않았기 때문이다. 또한 주입심도나 상재하중에 의해 P~q~t chart 및 고결체가 어떻게 변화하는 가에 대해서도 규명되어 있지 못하였다. 이러한 관점에서 각 주입패턴에 대한 해석을 통한 시간에 따르는 고결체의 거동과 지반주입상황을 예측할 수 있다면 주입시공에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다(Kim, 2012). 주입대상 지반의 주입특성을 간접적으로 관정할 수 있는 P~q~t chart가 선행연구자들(Minstry, 1988; Kim, 2012)에 의해서 대상지반의 토사층 및 암반층의 표준적인 주입유형패턴이 제안되었으며 이를 이용하면 대상지반에 대한 P~q~t chart 변화를 감지하여 주입유형을 분석하여 시공 전중후 단계에서 어느 때든지 조치방안을 시행할 수 있고 터널 강관다단 그라우팅 주입공사의 주입시공효과를 최종적으로 분석 및 평가 할 수 있다.

3. 개선된 강관다단 그라우팅 공법의 현장적용 및 검증

3.1 현장현황 및 시험계획

본 연구는 00공단에서 발주한 00노반시설 기타공사 구간 중 00안 고속도로 및 00휴게소(하행) 진입로 하부로 통과하는 토피고



Fig. 5. 00 Low Depth Railway Tunnel Construction Site

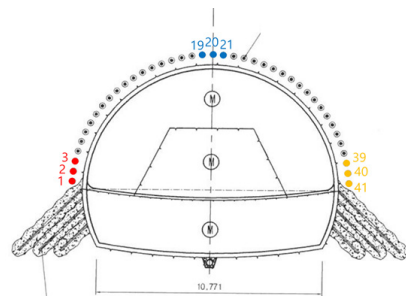


Fig. 6. Improved Steel Pipe Multistep Grouting Method Construction Plan

11.3~12.1 m 두께의 저토포 철도터널구간에서 수행하였다(Fig. 5). 개선된 강관다단 그라우팅 공법은 기존 공정(코킹, 실링, 주입)은 동일하며 새롭게 추가 개발한 요소기술은 새로운 한계주수시험법을 이용한 시공 전 주입제한조건 평가기술, 절리(공극, 틈)의 간격평가, 적합한 주입압력 평가, 최적의 작업완료시간 평가, 주입유형분석에 의한 주입효과평가 기술 등이다. Fig. 6은 개선된 강관다단 그라우팅 공법 시공 계획도이며 본 논문에서의 시험, 분석 및 평가에는 41번 공을 주로 적용하였다.

3.2 New 한계주수시험 결과평가 및 시공조건 결정

New 한계주수시험은 주입대상 막장의 41번 공에서 실시하였으며 시험결과평가에 의하여 한계주입압력을 10.0 kgf/cm² 이하 및 한계주입속도를 31.0 L/min 이하로 시공조건을 결정하였다

(Table 1). 새로운 시험기법의 도입으로 저토포 토사층 구간에서 상대적으로 저압에 속하는 완전침투영역 ~ 침투영역에서의 한계주입압력 및 한계주입속도를 결정하여 저토포 구간의 주입시공 시 지반과괴 위험을 미연에 차단 할 수 있는 근거를 마련하였다.

3.3 절리(공극, 틈)간격평가 및 재료의 선정

절리(공극, 틈)의 간격을 평가하기 위해 주입 전 측정된 현장투수계수 값이 이용된다. 주입대상지반의 현장투수계수 값은 $k=1.17 \times 10^{-4}$ cm/sec이며 절리의 간격을 구하기 위한 개선된 공법의 운영 시스템에 입력한 결과 절리간격은 129μm로 평가되었다 (Table 2). 절리의 간격은 주입재료의 입径의 크기를 결정하는 중요한 요소인자이다. 일반적으로 재료의 평균입径이 절리(공극, 틈)의 간격에 비하여 1/3정도 작아야 재료의 침투가 가능하다고

Table 1. New Water Injection Limit Test Assessment Result

P-41	TEST Assessment Result
Result DATA	
Soil Type	• Weathered soil & Weathered rock
Examination Result	• Hydro-fracture occurs at grouting pressure 10.1 kgf/cm ² • Hydro-fracture occurs at grouting amount 31.2 L/min
Work Condition	• Maximum grouting pressure (pcr) : 10.0 kgf/cm ² • Maximum grouting amount (qcr) : 31.0 L/min

Table 2. Hydraulic Aperture of Fracture Assessment Results

Hydraulic Aperture of Fracture					
NO	Title	Description	Unit	Equation	Value
1	d	The thickness of the formation	m		1.5
2	ρ_w	Density of water	t/m ³		1
3	η_w	Dynamic viscosity of water	m ² /s		0.000001
4	g	Gravitational acceleration	m/s ²		9.8
5	k	Hydraulic conductivity of the Soil	m/s	1.17×10^{-4} (cm/sec) (Site Measurement)	1.17E-06
6	T	Transmissivity	m ² /s	kd	1.755E-06
7	b_{hydr}	Hydraulic aperture of fracture	m	$\text{root}^3(12 \cdot T \cdot \eta_w) / (\rho_w \cdot g)$	0.000129
			μ m		129.04586

Table 3. Grouting Pressure Assessment Results

Assessment of Grouting Pressure					
NO	Title	Description	Unit	Equation	Value
1	h_w	The hydraulic head	m		1
2	ρ_w	Density of water	t/m ³		1
3	ρ_s	Density of Soil	t/m ³		2
4	g	Gravitational acceleration	m/s ²		9.8
5	H	Depth below ground surface	m		12.1
6	p_w	Groundwater pressure	t/m ²		1
7	$P_{g,max}$	Maximum grouting pressure	MPa	$p_g < 3\rho_s g H - 2p_w$	0.69188
8	$P_{g,min}$	Minimum grouting pressure	MPa	$> 3p_w$	0.0294

Table 4. Yield Strength Assessment Result of Grout

Yield Strength of Grout for Work Completion Time					
NO	Title	Description	Unit	Equation	Value
1	l_b	The length of the borehole	m		12
2	R_b	Diameter of borehole	mm		105
3	p_{hr}	Resistance strength of Homo-gel	kN/m ²		2,000
4	τ_{phr}	Yield strength of grout	kPa	$\tau > P_{hr} * R_b / 2l_b$	4,375
			Pa		4,375

평가하고 있다. 본 현장의 절리의 간격은 129 μ m이며 평균입경이 가장 큰 분말도 4,000 cm²/g 정도의 그라우트의 경우 약 17.1 μ m이며 분말도 4,000 cm²/g 그라우트(17.1 μ m \times 3) < 129 μ m이 되므로 슈퍼셀4000 주입재를 본 현장에 사용하였다. 새롭게 도입한 과학 및 공학적인 재료선정 방법의 적용으로 주입재료를 신속하게 결정할 수 있었으며 주입 중에도 배합비만 주의하면 되므로 여러 가지로 시공의 편의성이 증대되었다.

3.4 그라우팅 압력의 평가

본 현장에 적합한 그라우팅 압력은 최소 0.29 kgf/cm³ (0.029 MPa)에서 최대 6.9 kgf/cm² (0.69 MPa)까지 가능한 것으로 평가되어 본 주입시공에 이 기준을 적용하였다(Table 3). 기존 기술에는 적용하지 않았던 공학적인 그라우팅 압력 평가를 실시하여 한계주수시험에서 구한 압력과 서로 비교하여 두 값 중 안정적인 값을 시공에 적용하였다. 시공 중에도 상부지반의 융기 및 침하가 발생하지 않아 시공이 중지되는 일이 없었고 그라우팅 주입동안 안정성과 시공성이 증대되었다.

3.5 작업완료 시간평가

작업완료시간을 평가하기 위해 우선적으로 주입된 그라우트의 항복강도를 우선적으로 평가하여야 한다. 터널의 막장을 굴착해도

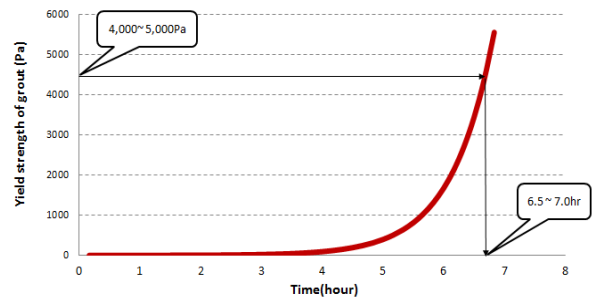


Fig. 7. Grouting Completion Time Assessment Graph

이상이 없는 상태의 재료의 전단강도라고 할 수 있다. 평가에 필요한 지반 및 그라우팅 시공에 필요한 인자 중 본 현장의 호모겔의 요구저항강도는 2 MPa (Korea Rail Network Authority, 2018b), 흙의 길이 12 m, 흙의 직경은 105 mm이며 이를 개선된 공법의 운영 프로그램에 입력하면 그 결과값이 평가되는데 그라우트의 항복강도는 4,375 Pa로 평가되었다(Table 4). 점도의 실험에 의한 그라우트의 항복강도를 시간에 따른 그래프를 작성하면 아래 Fig. 7과 같으며 항복강도가 약 4,375 Pa 정도의 강도가 나오기까지 시간과 상관관계를 그려보면 대략 6.5~7시간정도 지나야 작업을 완료하여도 이상이 없는 상태가 됨을 알 수 있다. 즉 본 현장에 필요한 작업완료 요구 시간은 약 6.5~7시간 이므로 이 시간을

Table 5. Grouting Type Analysis Result on Grouting Hole No.41

Grouting Result			Hole NO	41
			Grouting Depth	12 m (3step)
			Mixing Ratio	W/C=200 %
			Grouting Time	34~35 minute
			Grouting Amount	298ℓ
			Cement Amount	89 kg
Grouting Type Analysis	<p>A Type : Grouting pressure increases sharply sometime after grouting starts ① Ideal permeation grouting in sandy soil</p>			
	<p>E Type : Grouting pressure increases repeating in the pattern of going up and down ① Ground fracture of grout material injected first occurs progressively because of the newly permeating grout material. Thus, it can be considered that proper grouting is being achieved.</p>			

적용하였다. 일반적으로 현장에서는 강관다단의 주입 후 Korea Rail Network Authority(2018b)에서 제시한 18±1시간 이상의 주입재 경화시간이 필요한데 새롭게 도입된 기술의 적용으로 약 2.5~2.7배의 작업시간을 감축 시킬 수 있는 공학적인 근거를 마련하였으며 본 기술의 적용으로 시공시간을 크게 단축하였다.

3.6 주입효과 분석 및 평가

주입효과 분석 및 평가에 적용된 41번 공은 전체적으로 A유형과 E유형이 복합적으로 분석되었으며 A유형 영역의 경우 사질 층에서 이상적인 침투주입의 경우이며 E유형 영역의 경우 먼저 주입되어 갇혀있는 주입재가 후에 주입된 주입재에 의해 순차적으로 할렬과괴되면서 침투하는 경우로 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있는 경우로서 강관다단 그라우팅 시공이 양호하게 이루어진 것으로 평가되었다(Table 5). 일반적으로 강관다단 그라우팅기술의 주입효과를 평가 할 수 있는 방법이 거의 없었는데 본 기술의 도입을 편리하게 주입효과를 평가 할 수 있었으며 추후 다양한 강관다단 그라우팅 적용 현장에서 사용 할 수 있는 근거를 마련하였다.

4. 결론

본 연구는 저 토퍼 철도터널구간에서 터널굴착 시 보조공법으로서 새롭게 개선한 강관다단 그라우팅공법을 개발 및 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 새롭게 개선한 강관다단 그라우팅공법은 주입 전과 주입 후에 적용 할 수 있는 기술로 구분된다. 주입 전 적용기술로는 새로운 한계주수시험법을 이용한 주입시공 전 시공조건 평가 기술, 적합한 주입재료의 선정을 위한 절리(공극, 틈)간 격평가기술 및 지반파괴를 막을 수 있는 공학적인 주입압력 평가기술이다. 주입 후 적용 할 수 있는 기술은 전체공정을 단축 할 수 있는 최적의 작업완료시간 평가기술 및 개선된 기술의 운영시스템에서 주입 시 저장된 P~q~t chart를 이용하여 주입유형분석에 따른 주입효과평가 기술이다.
- (2) 개발된 새로운 한계주수시험방법, 절리간격평가에 의한 과학적인 재료선정, 공학적인 주입압력결정 및 작업완료시간 결정 등의 일련의 과정을 순차적으로 진행하여 주입효과

분석 및 평가를 실시하였다. 그 결과에 의하면 개선된 강관다단 그라우팅 공법의 적용으로 그라우팅의 시공이 양호하게 수행된 것으로 평가되었다.

- (3) 새롭게 개선된 강관다단 그라우팅 공법의 적용으로 터널굴착공사 중 상부 저토퍼 구간을 원활하게 운영할 수 있는 근거를 마련할 수 있었으며, 향후 저토퍼 구간의 터널강관다단 그라우팅 공사뿐만 아니라 다양한 터널(도로, 지하철, 공동구 등) 강관다단 그라우팅 공사에 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다고 사료된다.

References

- Axelsson, M. (2006). *Strength criteria on grouting agents for hard rock - Laboratory studies performed on gelling liquid and cementitious grout*, Licentiate Thesis, University of technology, Chalmers, Goteborg, Sweden.
- Eloranta, E. (2007). *Geophysical field theory*, Report STUK-A198, STUK, Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, Finland (Abstract in English).
- Houlsby, A. (1990). *Construction and design of cement grouting*, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Japan Grouting Association (2012). *The guide book of durability grouting method*, pp. 27-28 (in Japanese).
- Kim, J. C. (2012). *The grouting management technology using AGS (Automatic Grouting System)*, Construction New Technology No. 644, pp. 27-28 (in Korean).
- Kim, J. C. and Yoo, B. S. (2018). "A development of tunnel grouting programme using a research of grouting construction process." *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 11, No. 1, pp. 23-30 (in Korean).
- Korea Rail Network Authority (2018a). *The mix ratio experiment report of sealing & grouting material of steel pipe multistep grouting*, pp. 1-4 (in Korean).
- Korea Rail Network Authority (2018b). *The specification of small steel pipe multistep grouting construction*, pp. 1-5 (in Korean).
- Ministry, J. F. (1988). *Important aspects of river valley projects*, Mahajan Book Distributors, Vol. 2, Amdavad, Gujarat, India.
- Tolppanen, P. and Syrjanen, P. (2003). *Hard rock tunnel grouting practice in Finland, Sweden, and Norway*, Publications no:1, Report 8:2003, Finnish Tunnelling Association, Finland.