

탄산을 첨가한 슬러리 실드 터널에서의 침투 거동 및 굴진면 안정성 평가

이익범¹ · 최기훈² · 이인모^{3*}

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사

²정회원, 두산건설(주) 인프라BG 기술지원팀 차장

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Infiltration behavior and face stability of carbonate-added slurry shield tunnel

Ik-Bum Lee¹, Ki-Hoon Choi², In-Mo Lee^{3*}

¹Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Managing Director, Doosan E&C

³Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: Slurry shield tunnelling ensures stability by pressurizing the tunnel face with the slurry contained in the chamber. It resists water and earth pressure in order to prevent the failure in the tunnel face during tunnel excavation. If the ground is relatively coarse, slurry can not clog the tunnel face and excessive slurry infiltration will occur. In this case chemical compounds or additives should be added to the slurry in order to improve the clogging phenomena at the tunnel face. In this study, the effect of the carbon dioxide gas as an additive to the slurry instead of chemical compounds on the capability of enhancing the clogging in the tunnel face is investigated. Bubbles arising from the carbonate-added slurry are trapped in the soil voids enhancing the clogging capability. This effect is studied in this paper by performing laboratory model tests simulating in-situ conditions, and by adopting the fine particle clogging theory. Tunnel face stability analysis was also performed and it was found that the effective size (D_{10}) of soils which can guarantee tunnel stability utilizing the carbonate-added slurry increased from 1.0 mm up to 2.6 mm. Moreover, Stability analysis showed that the tunnel face is stable if the λ (deposition coefficient) value is greater than 0.007 sec^{-1} .

Keywords: Slurry, Carbon dioxide, Clogging effect, Face stability, Deposition coefficient

초 록: 최근 연약지반 터널 현장에 활용되는 슬러리 실드 TBM은 굴진면으로 슬러리가 주입됨으로 그 안정성을 확보하는 공법이다. 하지만 간극이 과다하여 슬러리에 의한 폐색이 발생하지 않는 조립질 지반에서는 적용이 어렵기 때문에 첨가제를 혼입하여 사용하기도 한다. 본 연구에서는 첨가제의 역할로서 탄산가스를 주입함으로 슬러리가 주입되었을 때에 간극 내에 탄산가스가 흡착하여 폐색현상을 촉진시키는 효과를 규명하였다. 실제시험 결과 탄산 혼입에 따라 슬러리 실드 터널이 적용 가능한 유효입경이 1.0 mm에서 2.6 mm가량으로 증가하였고, 필터계수 λ 가 0.007 sec^{-1} 이상인 경우에 탄산에 의한 효과가 발생함을 알 수 있었다.

주요어: 슬러리, 탄산, 폐색 현상, 굴진면 안정성, 필터 계수

1. 서론

슬러리 실드(Slurry Shield) TBM 공법은 실드 내에 충분한 슬러리를 굴진면으로 가압하여 주입함으로써

지반을 지지하며 굴착해 나아가는 공법을 뜻한다. 슬러리 실드 TBM 공법의 개요도는 Fig. 1과 같다. 지상 플랜트에서 제작된 슬러리를 송니관을 통해 이송하여 커터헤드 후면에 위치한 챔버 내에 충전시킨 후 굴진면 전방으로 수압 및 토압보다 다소 높은 이수압을 가함으로써 굴진면의 안정성을 확보한다. 이후 굴착된 버력 및 토사는 슬러리와 혼합되어 유체 형태로

*Corresponding author: In-Mo Lee
E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received July 3, 2013; Revised July 17, 2013;
Accepted July 20, 2013

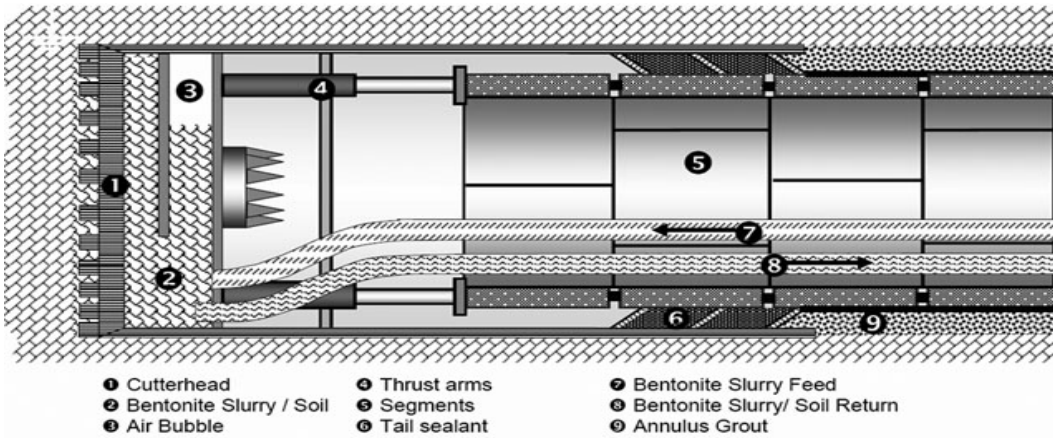


Fig. 1. Face supporting principle of slurry shield

배니관을 통해 지상으로 배토하게 된다. 배토된 혼합 유체는 토사와 슬러리를 분리하는 과정을 거쳐 다시 주입함으로 일련의 사이클로 순환하게 되는 방식이다.

슬러리 실드 TBM에서의 굴착면 지지 기본 원리는 챔버 내 슬러리가 가압됨에 따라 굴진면에서의 토압 및 수압에 저항하고 굴진면 변형 및 지반 침하를 억제하는 것이다. 또한 가압에 의해 슬러리 입자가 지반 간극에 흡착됨에 따라 지반의 점착성이 증가하게 되고 굴착면 표면으로 필터케이크가 형성됨에 따라 이 수압을 효과적으로 전달할 수 있도록 한다. 굴착면 표면에 필터케이크가 형성되기 위해서는 슬러리가 지반의 폐색을 먼저 유발해야 함이 필수적이다.

슬러리 침투에 의한 폐색 메커니즘은 Fig. 2와 같이 표면 침투(Surface filtration), 깊은 침투(Deep filtration), 유동적 블로킹(Rheological blocking)의 세 가지 케이스로 나눌 수 있다. 슬러리의 기본 구성 요소인 벤토나이트의 특성으로 인해 폐색 메커니즘이 발생하게 된다(Xanthakos, 1979). 또한 일반적인 폐색 메커니즘에서는 벤토나이트의 역할이 가장 중요한 요소이지만, Fritz (2007)는 높은 투수계수를 지닌 지반에 적용할 슬러리 및 첨가제를 제안하였다. 이러한 첨가제들은 벤토나이트와 함께 물리 화학적 작용을 함으로써 슬러리 성능을 향상시켰으며 성분이나 혼합비에 따라 효과가 달라지는 것을 증명하였다.

이러한 슬러리 폐색 메커니즘을 활용한 슬러리 실

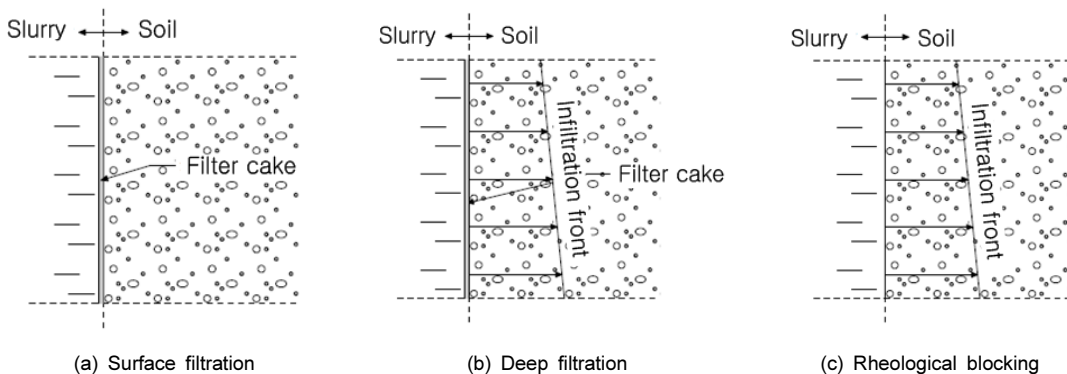


Fig. 2. Face filtration mechanisms in slurry shields (Xanthakos, 1979)

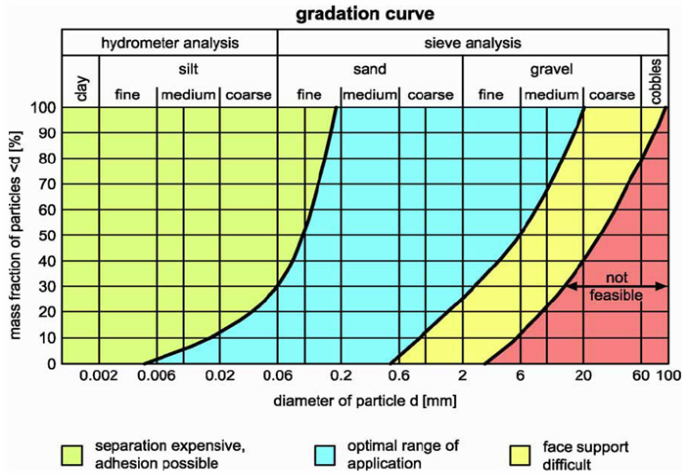


Fig. 3. Fields of application for slurry shield machine (Krause, 1987)

드 TBM 적용범위를 Krause (1987)가 Fig. 3과 같이 제시하였다. 슬러리 쉴드 TBM의 적용은 일반적으로 양호한 사질토 지반에서 가장 적합한 것으로 나타나고, 이에 반해 유효입경(D_{10})이 0.02 mm 이하로 작고 지반 내 실트량이 30% 이상 존재하여 슬러리와 토사의 분리가 어려우며 배토가 불량하게 되는 지반과 유효입경(D_{10})이 1 mm 이상이고 지반 내 자갈량이 30% 이상 포함되는 지반 상태에서는 굴진면 안정성에 있어 문제가 발생하는 범위이다.

본 연구에서는 지반 간극이 과다하여 일반 벤토나이트 슬러리로 굴진면이 안정하지 못한 지반에 탄산을 첨가함으로써 물리적 폐색 효과를 유발하고 굴진면을 안정화함으로써 기존에 제안한 적용범위로부터 개선된 적용범위를 제안하고자 한다. 아울러, 탄산 및 첨가제의 첨가에 따른 안정성 증대 효과를 규명함으로써 슬러리 쉴드 TBM의 개선된 적용범위를 새로이 제시하고자 한다.

2. 탄산을 첨가한 슬러리 침투 이론

2.1 슬러리 폐색 이론

슬러리 입자가 지반으로 침투함으로써 폐색 현상이

발생하는 것을 이론적으로 나타내기 위해 Fig. 4와 같은 지반 상태를 가정한다. 하방향 흐름이 발생하여 상부의 슬러리 입자들이 지반으로 침투하여 지반 내 간극에 퇴적하게 되며 이러한 현상을 이론적으로 모사할 수 있다.

슬러리 입자가 정상류 흐름에 의해 이동하여 퇴적되는 현상을 입자의 질량 평형상태를 고려하여 나타낸 지배 방정식은 식 (1)과 같고 이를 간단하게 나타내면 식 (2)로 표현할 수 있다(Gruesbeck and Collins, 1982).

$$\frac{\partial}{\partial t}(nC + n_i\sigma) + v\frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

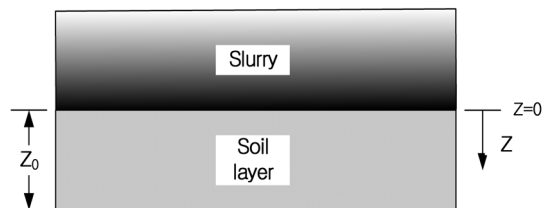


Fig. 4. Schematic view of slurry and face soil layers

여기서, C = 단위 간극 부피당 입자의 농도; σ = 단위 간극 부피당 퇴적량; n_i = 초기 간극률; n = 퇴적 이후 간극률; v = 유출속도; z, t = 시간과 공간의 좌표; V = 투수속도(v/n)이다. 일반적으로 시간에 따른 퇴적량은 흐름 유체의 입자 농도에 비례하므로 필터계수 (λ)에 의해 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda C = 0 \quad (3)$$

주어진 편미분 방정식은 투수 속도가 침투거리에 따라 일정할 경우 특성함수를 이용해 상미분 방정식으로 변환하여 해를 구하면 슬러리 입자의 농도는 시간과 거리에 따른 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(z,t) = C_i e^{-\lambda z/V} U(t - \frac{z}{V}) \quad (4)$$

단위 시간당 슬러리 입자의 퇴적량은 유동 상태의 슬러리 농도에 비례한다는 가정으로부터 단위 간극 부피당 슬러리 입자의 퇴적량(σ)은 식 (5)와 같다.

$$\sigma(z,t) = \lambda C_i e^{-\lambda z/V} U(t - \frac{z}{V}) \quad (5)$$

위에 주어진 식을 총 침투깊이로 적분함으로써 총 퇴적량(W)을 구하면 다음과 같다.

$$W(z,t) = [\frac{z}{V} \cdot e^{-\frac{\lambda z}{V}} + \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\frac{\lambda z}{V}} - t \cdot e^{-\frac{\lambda z}{V}} + t - \frac{1}{\lambda}] \cdot V \cdot C_i \cdot A \cdot n \quad (6)$$

실내 실험을 통해 간극 내 흡착한 슬러리의 퇴적량을 역산하여 필터계수 λ 값을 산정할 수 있다. 이는 침투 거동의 변화를 파악하는데 중요한 인자로 사용한다.

2.2 필터계수(Deposition Coefficient)

Reddi와 Bonala (1997)은 유동입자의 확률론적 흡착모델을 네트워크 모델로 접근함으로써 이론적인 필터계수를 구하였다. Fig. 5와 같이 일정한 간극 반경을 가지는 원형 튜브내에서 입자의 흐름 과정에서 입자가 간극 내에 흡착이 된다고 가정할 수 있으며 이를 통해 구해진 필터계수는 식 (7)과 같다.

$$\lambda = \frac{V}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}} [4(\theta a)^2 - 4(\theta a)^3 e^{(b^2-2m)/2} + 4(\theta a)^4 e^{2(b^2-m)}] \quad (7)$$

여기서, V = 간극유속(투수속도); α^* = 간극튜브의 유효길이; a = 유동입자의 크기; m = 간극반경 r 의 대수분포에서 평균값; b = 간극반경 r 의 대수분포에서 표준편차; θ = Lumped parameter(입자 간에 작용하는 여러 가지의 힘이 포괄적으로 고려된 계수)이다.

필터계수는 주어진 식과 같이 유체의 흐름으로 발생하는 간극유속과 유동입자 및 간극의 크기, θ (Lumped parameter)에 관한 함수이다. 여러 학자들에 의해 필터계수는 입자의 흡착현상에 영향을 미치는 것이 밝혀졌다. 따라서 필터계수를 통해 흡착 및 폐색을 판단할 수 있다. 또한 흡착이 진행 중일 때에는 간극반경의 대수분포에 따른 영향에 비해 간극유속에 의한 영향이 크므로 간극반경 변화가 미소할 경우에는 V/λ 값이 상수화 될 수 있으므로 간극유속과 필터

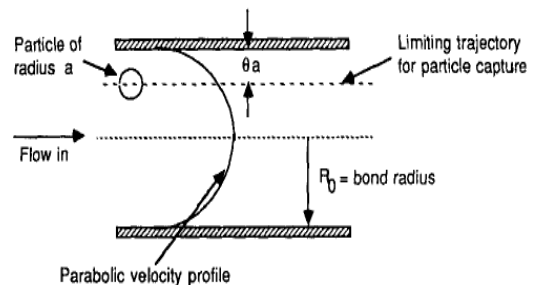


Fig. 5. Flow of small particles through a tube (Reddi and Bonala, 1997)

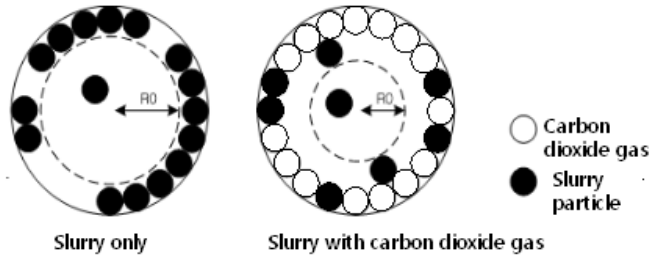


Fig. 6. Effect of carbonate on clogging phenomena

계수의 관계 V/λ 값이 폐색 현상이 효과를 확인하고 굴진면의 안정성을 평가할 수 있는 중요한 인자가 될 수 있다.

본 연구에서는 슬러리 실드 터널에서 사용하는 벤토나이트 슬러리에 탄산을 첨가함으로써 변화하는 침투 거동 및 굴진면 안정성을 판단하고자 한다. 탄산을 첨가함에 따라 슬러리 성능 개선 효과의 원리는 Fig. 6과 같다. 실제 지반의 간극을 원형 튜브형태로 가정하였을 때 간극 내에서 발생하는 탄산가스가 벤토나이트 입자와 같이 간극에 흡착하게 되어 간극반경 R_0 가 감소함에 따라 필터계수가 증가하여 폐색이 효과적으로 발생할 것이다. 이러한 원리에 의해 지반에 탄산슬러리를 주입하였을 경우 필터계수와 V/λ 의 변화를 살펴보고 이를 통해 폐색효과 향상 및 굴진면 안정성 증대를 확인할 수 있다. 또한 탄산슬러리는 지반에 주입 시 굴진면 전체에 고르게 분포할 수 있고,

재료 분리에도 용이할 것이라 판단된다.

3. 슬러리 주입실험 거동 분석

3.1 실험 장치의 구성

실내 모형 실험 장치는 슬러리 실드 터널 공법에서의 슬러리 주입을 모사하도록 하였으며 크게 모형 지반을 형성하는 챔버, 슬러리가 교반되어 주입되는 챔버, 압력을 가하기 위한 Compressor, 압력을 제어하기 위한 레귤레이터로 구성되어 있다. 또한 모형 지반에 슬러리가 주입되기 시작하면서 유출량을 측정하기 위해 수조를 사용하였으며 이를 통해 시간별 유출량 분포를 파악하도록 하였다. 실험에 사용된 장치의 개략적인 모습은 Fig. 7과 같다.

먼저 실험에 쓰인 지반 모사 장치는 직경 16 cm,

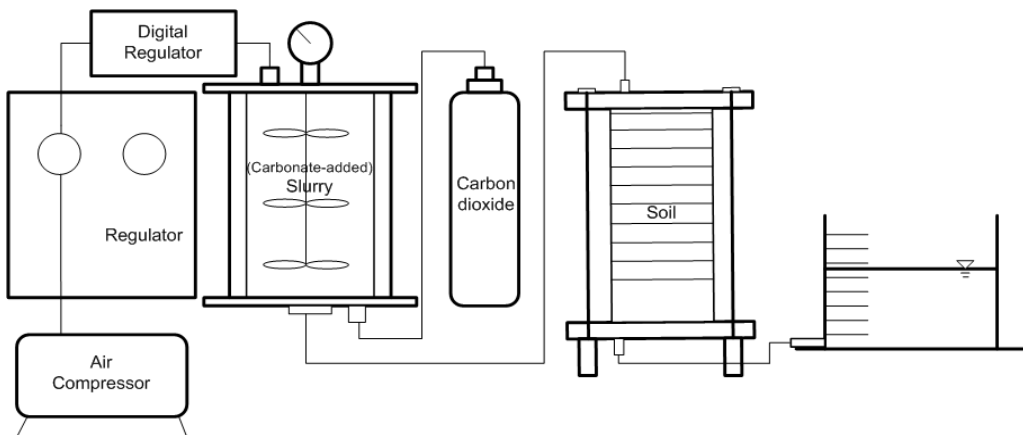


Fig. 7. Schematic diagram of experimental set up

총 높이 48 cm의 실린더형 아크릴 챔버로 제작하였다. 슬러리 주입 특성을 파악하기 위해 깊이별 슬러리 퇴적량을 측정해야 하므로 11개의 작은 챔버로 나누어 이루어져있다. 각 챔버의 사이에는 #40체(Case 1, Case 2), #16(Case 3, Case 4)를 두어 시료의 유동은 발생하지 않으면서 슬러리의 유동은 원활히 발생하도록 하였으며 이는 깊이별 퇴적량 측정 시 챔버 간 경계면이 되도록 하였다. 두 번째로 슬러리 주입 장치는 원형 아크릴 챔버로 되어 슬러리의 교반상태 및 주입상태를 점검할 수 있으며 챔버 내에는 교반된 슬러리가 지반으로 주입되는 시간 동안에도 재료 분리가 일어나지 않도록 전동 프로펠러를 설치하였다. 챔버 상단 판넬에는 교반된 슬러리를 채울 수 있는 밸브와 Air Compressor에서 나오는 공기압을 공급할 수 있는 밸브가 설치되어 있으며, 챔버 하단 판넬에는 슬러리를 지반 챔버로 주입시키는 밸브가 설치되었다. 세 번째 압력 컨트롤 장치는 슬러리 주입 장치로부터 가해지는 압력을 제어하는 장치로 Air Compressor와 2개의 레귤레이터로 이루어져 굴착면 보다 약 20 KPa 큰 압력을 일정하게 가할 수 있도록 하였다. 그 외 기타 장치로는 탄산을 첨가한 슬러리 주입을 위한 탄산가스와 실험 시 발생하는 유출량을 측정하기 위해 대용량 물수조 및 전자저울을 사용하였다.

3.2 실험 과정 및 물성치

먼저 지반 모사 장치에 일정한 단위중량으로 지반을 조성한다. 각 시료마다 작은 챔버에 가득 찰 수

있는 단위중량의 시료를 넣은 후 고무망치로 챔버에 진동을 주어 균질한 지반을 모사할 수 있도록 하였다. 지반 모사가 완료된 후에는 슬러리를 조성한다. 슬러리 실드 터널 공법에서 일반적으로 적용되는 슬러리 농도인 6%로 조성하며, 교반 상태에 따른 슬러리 특성 변화를 방지하기 위해 30분 동안 일정 속도로 교반한다. 교반이 완료된 슬러리는 슬러리 주입 장치에 채워 넣고 탄산이 첨가되는 경우에는 탄산가스통에 연결된 호스를 슬러리 주입 장치에 연결한 후 충분히 포화되도록 탄산가스를 주입한다. 교반한 슬러리는 주입 실험이 시작되기에 앞서 굴착면 전면에 균질하게 주입시키기 위해 비워둔 최상단 챔버에 먼저 가득 채워넣는다. 이후 가압 컨트롤 장치에 의한 일정한 공기압이 슬러리 주입장치에 가하면서 슬러리의 지반 내 주입이 시작되도록 한다. 주입압은 디지털 레귤레이터를 통해 수압보다 약 20 kpa 정도 큰 30 kpa의 압력을 가하였으며 슬러리의 주입과 동시에 유출되는 물을 수조에 담으며 시간별 유출량을 측정하였다. 실험이 종료된 후에는 작은 챔버내에 퇴적된 슬러리를 걷어내 그 양을 측정하였다.

본 실험은 탄산을 첨가한 슬러리에서의 거동 변화 분석을 파악하기 위함이므로 상대적으로 큰 유효입경과 투수계수에서의 시료를 사용하였다. 총 4가지의 시료에서 일반 슬러리와 탄산 및 첨가제를 첨가한 슬러리 주입 실험을 실시하였으며 각 시료는 일정한 단위중량으로 조성하였다.

비중시험, 입도분포시험, 투수계수 실험 등을 통해 구해진 시료의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Soil properties

Types of samples	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Specific gravity G_s	2.1	2.13	2.14	2.14
Porosity n	0.341	0.367	0.413	0.449
Effective grain size D_{10} (mm)	2.35	2.60	2.80	4.00
Dry unit weight γ_d (kN/m ³)	14.86	14.74	14.62	14.62
Permeability k (cm/sec)	5.31×10^{-2}	5.83×10^{-2}	5.94×10^{-2}	6.14×10^{-2}

3.3 유출량 곡선

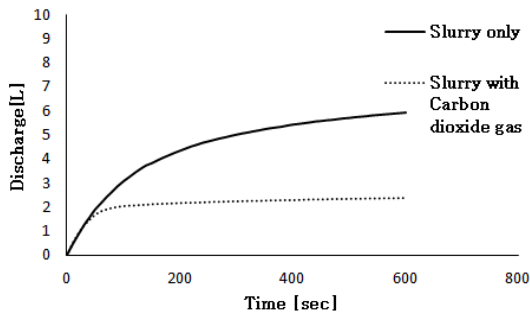
본 연구 목적에 맞게 조성한 시료 A, B, C, D를 일정한 단위중량의 지반으로 모사한 후 슬러리 주입 실험을 실시하였을 때 시간별 유출량의 그래프는 Fig. 8과 같다.

시료 A ($D_{10} = 2.35 \text{ mm}$, $k = 5.31 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$)와 B ($D_{10} = 2.60 \text{ mm}$, $k = 5.83 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$)의 경우에는 일반슬러리에 비해 탄산슬러리 주입실험에서 폐색 시간이 단축되고 최종 유출량 또한 감소하는 것을 미루어 보아 탄산에 의해 폐색현상이 더 효과적으로 발생하였다는 것을 알 수 있다. 이보다 더 큰 간극을 가지는 시료 C ($D_{10} = 2.80 \text{ mm}$, $k = 5.94 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$)에서의 실험 결과 탄산만을 주입한 탄산슬러리에서는 큰 영향을 미치지 못하였지만 탄산과 함께 #20~#40 사이의 흙 5%를 추가로 주입하였을 때 탄산에 의한 폐색효과 증진이 발생하였다. 마지막으로 가장 큰 간

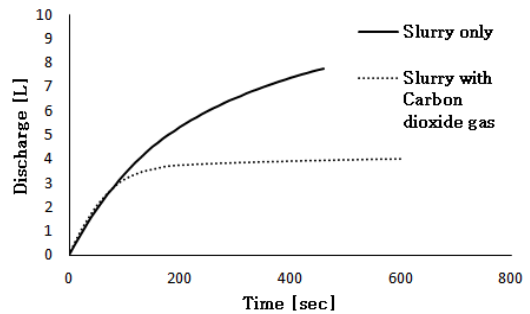
극의 시료 D ($D_{10} = 4.00 \text{ mm}$, $k = 6.14 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$)에서는 일반슬러리, 탄산슬러리, 흙 입자가 혼합된 탄산 슬러리 모두에서 굴착면 표면에 필터케이크를 형성하지 않고 지반내로 계속 침투해 버리는 메커니즘을 보였다. 이는 지반 내 간극이 과다하여 탄산 및 흙입자의 흡착이 불가능한 상태인 것으로 판단된다.

3.4 퇴적량 분포

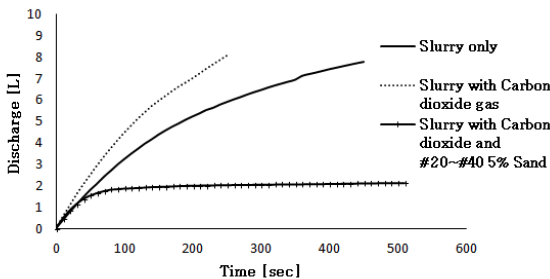
슬러리 주입 실험에 의한 유출량 측정이 완료된 후 각 챔버에 퇴적되어 있는 벤토나이트의 퇴적량을 측정 할 수 있다. 또한 실험에서 산출된 유출량, 유출 속도 등의 데이터를 이론값에 대입하면 실험에 의한 필터계수를 구할 수 있다. 또한 실험을 통해 구한 필터계수의 값이 타당한가를 판단하기 위해 구해진 필터계수를 식 (8)에 대입하여 깊이 별 퇴적량을 실험 값과 비교할 수 있으며 이를 통해 필터계수 및 최종



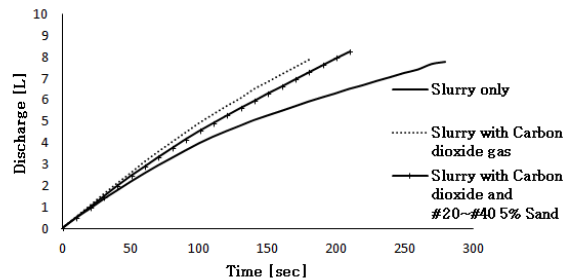
(a) Discharge curve in Sample A



(b) Discharge curve in Sample B



(c) Discharge curve in Sample C



(d) Discharge curve in Sample D

Fig. 8. Experimental results

침투깊이를 산정 할 수 있다(이인모 등, 2004). 식 (8)을 통해 깊이별 퇴적량 분포 곡선을 구하면 깊이가 증가함에 따라 퇴적량은 로그 곡선 형태로 감소하는 양상을 보이며, 그래프를 통해 최대 퇴적량의 1% 정도의 슬러리가 침투한 깊이까지를 최종 침투깊이로 산정하였다. 이러한 과정을 통해 산출된 필터계수와 최종 침투깊이 등의 데이터를 Table 2에 나타내었다.

$$\sigma(z,t) = \lambda \cdot C_i \cdot e^{-\lambda z/V} \cdot (t - \frac{z}{V}) \cdot A \cdot h \quad (8)$$

여기서, $\sigma(z,t)$ = 깊이별 퇴적분포; λ = 필터계수; C_i = 현탁액의 농도; V = 간극유속; t = 시간; A = 시료의 단면적; h = 시료의 높이를 의미한다.

탄산이 지반 내로 침투하여 흡착되면 벤토나이트 입자와 같이 물리적 폐색을 유발하고 이에 따라 필터계수(λ) 값이 증가하게 된다. 또한 최종 침투깊이는 감소하게 된다. 시료별 필터계수 및 침투깊이를 살펴 보면 유출량 곡선에서와 마찬가지로 시료 A, B의 경우에는 탄산슬러지에서, 시료 C의 경우에는 흙 입자가 혼입된 탄산슬러지에서 폐색 효과의 증진을 찾

아볼 수 있다.

4. 굴진면 안정성 평가

4.1 굴진면 안정성 평가 이론

굴진면 안정화에 필요한 최소 굴진면 지보압 Δp 는 슬러리가 굴진면 표면에 필터케이크를 형성하는 멤브레인 모델로서 지보압이 온전히 지반에 전달되는 경우이다. 하지만 대부분의 실제 지반에서는 슬러리 주입에 따라 슬러리 입자가 지반 간극으로 일정 깊이까지 침투한 이후 굴착면 표면에 필터케이크가 형성되는 거동을 보인다. 이러한 경우에는 지보압이 굴진면에서 슬러리에 가한 압력이 아닌 지반 내에서 작용하는 침투력으로 작용하게 된다. 따라서 슬러리 침투에 따른 실제 작용하는 지보압은 침투거리에 따라 감소하는 양상을 보이게 된다.

슬러리의 침투깊이가 e만큼 발생하였을 경우 이때의 굴진면 지보력(S)은 침투수력의 크기와 동일하며 멤브레인 모델에서의 굴진면 지보력(S_0)에 비해 감소하는 양상을 보인다. 임의의 터널 직경 D에서

Table 2. Filtration coefficients and infiltration depths back-calculated from experimental results

Samples	Amounts of clogged particle (g)	Clogging time, t (sec)	Discharge amount (ml)	Fluid velocity (cm/sec)	Filter coefficient, λ (sec ⁻¹)	V/ λ (cm)	Final infiltration depth (m)	
A	Normal	118.72	450	5580	0.181	2.53×10^{-3}	71.49	1.569
	Carbonate	84.15	110	2070	0.274	2.71×10^{-2}	10.13	0.270
B	Normal	174.88	460	7760	0.229	3.13×10^{-3}	73.04	1.84
	Carbonate	141.10	180	3710	0.279	1.40×10^{-2}	19.95	0.59
C	Normal	134.18	450	7760	0.218	2.17×10^{-3}	100.314	1.976
	Carbonate	148.47	250	8050	0.406	4.34×10^{-3}	93.657	1.994
	Sand 5%+ Carbonate	63.57	190	2010	0.134	1.03×10^{-2}	12.965	0.260
D	Normal	123.2	280	7790	0.332	3.02×10^{-3}	109.877	1.936
	Carbonate	128.17	180	7880	0.522	4.90×10^{-3}	106.559	1.928
	Sand 5%+ Carbonate	131.88	210	8260	0.469	4.24×10^{-3}	110.644	1.983

슬라이딩 각도 ω 로 파괴면이 형성되었을 때 침투에 의한 지보력은 침투 깊이만큼의 Control volume과 비례하고 이는 멤브레인 모델에서의 지보력과 비례 나타낼 수 있다(Anagnostou and Kovari, 1994).

$$n = \frac{q_t}{q \cdot K} \quad (e < \tan\omega) \quad (9)$$

$$\frac{S}{S_0} = \frac{D \cdot \tan\omega}{e} \quad (e > \tan\omega) \quad (10)$$

여기서, S_0 = 멤브레인 모델에서의 지보력; D = 터널 직경; ω = 슬라이딩각도; e = 침투깊이이다.

4.2 굴진율을 고려한 침투 깊이 산정

앞서 살펴본 슬러리 침투 거동에서는 지반의 간극으로 슬러리가 주입됨으로써 입자들이 흡착하게 되고 굴진면 표면에 필터케이크를 형성하면서 발생하는 폐색 현상을 시간과 거리에 따른 일차원 침투를 가정한 모델로서 제시하였다. 이러한 침투 거동은 슬러리 쉴드 TBM 터널에서 장비가 정지한 상태에서의 현상과 같다고 할 수 있다. 하지만 실제 슬러리 쉴드 터널에서는 정지 시에는 물론 굴진면이 굴착되어 가는 동안에도 슬러리를 주입하므로 굴진율을 고려한 슬러리의 침투 거동 및 굴진면 안정성 또한 살펴보아야 한다.

슬러리 쉴드 터널에서 실제로 슬러리가 침투되는 속도(dt/de)는 일정 시간이 지나면 현장에서의 장비 굴진율과 동일해 지며 이 때의 침투속도는 식 (11)과 같다(Anagnostou and Kovari, 1994).

$$\frac{de}{dt} = k \frac{\mu_w}{\mu_b \gamma_w} \frac{1}{f_{so}} \left(\frac{e_{\max}(z) - e(z,t)}{e(z,t)} \right) \quad (11)$$

여기서, k = 지반의 투수계수; μ_b = 슬러리의 점성계수; μ_w = 물의 점성계수; f_{so} = 지체경사를 나타내며 최종 침투깊이와 시료의 높이에서의 침투속도를 식

(11)에 대입해 투수계수와 유체의 점도에 관한 함수를 상수화하여 깊이별 침투속도를 침투곡선 그래프로 나타낼 수 있다. 이처럼 구해진 침투깊이 별 침투속도 그래프를 통해 정지시와 굴진시 침투깊이를 구할 수 있다. 정지시에는 침투속도가 0일때의 침투깊이 즉 최대침투깊이이며 실제 TBM 굴진율을 고려하면 침투곡선과 굴진율이 교차하는 지점이 침투깊이라고 할 수 있다. 여기서 굴진율은 터널 현장 및 TBM 장비에서 발생하는 여러 가지 요인에 따라 각기 다르지만 본 연구에서는 굴진율을 약 5 mm/min을 적용하여 침투깊이를 산정하였다.

4.3 실내 실험 결과를 활용한 굴진면 안정성 평가

슬러리 주입 실험을 통해 산출된 데이터를 바탕으로 굴진면 안정성을 평가하도록 한다. Anagnostou and Kovari (1994)가 제시한 바에 의하면 침투 깊이의 증가에 따라 지보력이 감소하게 되며, 이를 멤브레인 모델에 적용하였을 경우에 안전율 또한 감소하는 양상을 보이게 된다. 슬러리가 지반에 침투하면서 발생하는 지보력의 변화 양상은 식 (9), (10)과 같다. 터널의 직경 및 슬라이딩 각도는 7 m 와 20°로 적용하여 지보력비(S/S_0)를 구할 수 있으며, 멤브레인 모델 ($S=S_0$ 일 때)에서의 안전율을 1.5로 적용함으로써 슬러리 주입 실험을 통한 굴진면 안정성 평가를 실시하였다. 또한 굴진율 5 mm/min을 고려한 굴진면의 지보력 및 안전율을 구하여 Table 3에 나타내었다.

계산 결과 시료 A, B, C에서 보여지는 것과 같이 탄산 및 흙 입자가 혼입되는 경우에 침투깊이는 감소하고 지보력 및 안전율이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이로써 일반슬러리에 비해 탄산이 첨가되었을 경우 폐색 효과가 촉진되고 굴진면을 안정화 시키는 역할을 한다고 판단할 수 있다. 하지만 시료 D와 같이 과다한 간극의 지반인 경우에는 탄산 및 흙 입자가 첨가되어도 굴진면이 안정하지 않다는 것을 알 수

Table 3. Support force ratio and safety factor

Support force ratio and safety factor		Final infiltration depth (m)	Ratio of Supporting capacity (S/S ₀)	Safety factor	
A	Slurry only	Steady state	1.569	0.679	1.018
		Considering advance rate	1.412	0.711	1.067
	Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	0.270	0.945	1.417
		Considering advance rate	0.266	0.946	1.418
B	Slurry only	Steady state	1.843	0.623	0.934
		Considering advance rate	1.660	0.660	0.990
	Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	0.592	0.879	1.318
		Considering advance rate	0.567	0.884	1.326
C	Slurry only	Steady state	1.976	0.596	0.893
		Considering advance rate	1.755	0.641	0.961
	Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	1.994	0.592	0.888
		Considering advance rate	1.867	0.618	0.927
	Sand 5%+ Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	0.260	0.947	1.420
		Considering advance rate	0.254	0.948	1.422
D	Slurry only	Steady state	1.936	0.604	0.906
		Considering advance rate	1.792	0.633	0.908
	Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	1.928	0.605	0.891
		Considering advance rate	1.836	0.624	0.949
	Sand 5%+ Slurry with carbon dioxide gas	Steady state	1.983	0.594	0.936
		Considering advance rate	1.873	0.617	0.925

있다. 또한 굴진율을 고려하였을 경우에는 침투깊이가 감소하므로 이에 따른 굴진면 안전율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4.4 슬러리 실드 터널 적용 범위 개선

슬러리 실드 터널은 연약한 지반에 주로 사용되지만 그 적용 범위에도 분명히 한계가 있다. Fig. 3에서와 같이 유효입경 D_{10} 이 0.02 mm 이하로 작고 지반 내 실트량이 30% 이상 존재하여 슬러리와 토사의 분리가 어려우며 배토가 불량하게 되는 구간과 유효입경 D_{10} 이 1 mm 이상이고 지반 내 자갈량이 30% 이상 포함되어 굴진면 안정성에 있어 문제가 발생하는 범위에서는 슬러리 실드 터널의 적용이 어렵다(Krause, 1987). 이와 같이 제안한 유효입경(D_{10})의 적용 범위에 대한

여 안전율을 살펴보고 이에 따라 탄산의 첨가에 따른 개선된 적용 범위를 새로이 제안하고자 한다. 먼저 굴진율을 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우의 유효입경 별 안전율을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었으며 멤브레인 모델에서의 안전율 1.5를 기준으로 안전율 1.3일 때의 경계를 안정과 불안정의 경계로 정하였다.

그래프의 값들을 살펴보면 유효입경이 작을수록 간극이 작아져 슬러리의 종류에 상관없이 굴진면이 안전한 값을 가진다. 반대로 유효입경이 증가하게 되면 지반의 간극이 커지게 되어 일반 벤토나이트 슬러리 입자만의 흡착으로는 안정성을 확보할 수 없고 탄산 및 흙 입자를 첨가함으로써 그 안정성을 확보할 수 있다. 4가지 종류 시료에서의 실험 데이터를 통해 안정과 불안정의 경계를 유효입경 크기로 다음

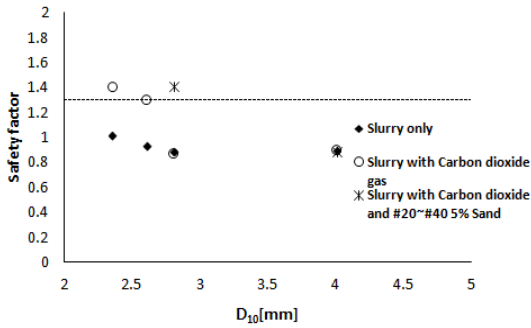


Fig. 9. Face safety factor vs. effective grain size (steady state condition)

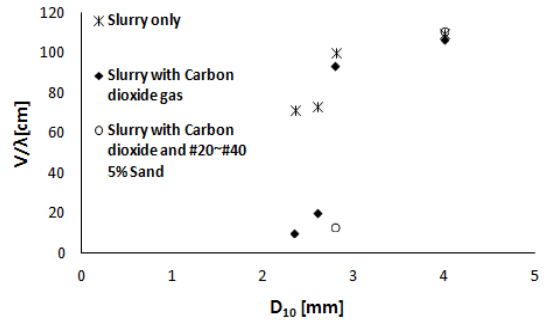


Fig. 11. V/λ vs. Effective grain size D_{10}

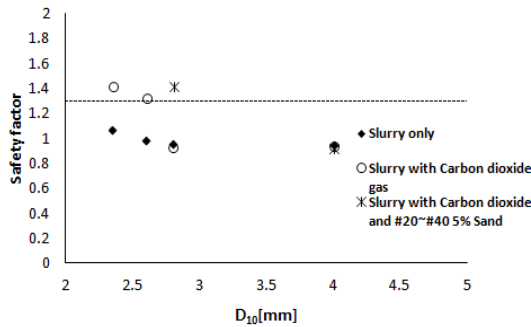


Fig. 10. Safety factors classified by effective grain sizes (considering tunnel advance rate)

Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타난 바와 같이 첨가제의 추가에 따라 굴진면이 안전할 수 있는 유효입경의 크기는 점차 증가한다. 이는 일반슬러리에 탄산가스 및 흙 입자가 함께 주입됨에 따라 간극을 막아주는 물리적 폐색 효과를 발휘했기 때문이다. 따라서 탄산을 첨가한 슬러리를 주입하였을 경우에는 Krause (1987)가 제시한 슬러리 쉴드 터널 적용에 적합한 유효입경 1 mm보다

큰 2.60 mm의 값에서도 굴진면의 안정성을 확보할 수 있다. 또한 흙 입자를 혼입하였을 경우에는 이보다 큰 유효입경에서도 굴진면은 안정하다고 할 수 있다. 즉 슬러리 쉴드 터널이 적용이 어려운 지반 조건에서 탄산을 첨가함으로써 그 안정성을 확보할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

이와 같이 슬러리 쉴드 적용 범위의 새로운 제안에 있어 유효입경만을 고려하는 경우에는 전 절에서 언급한 바와 같이 지반의 물리적 특성이나 슬러리의 유동학적 특성 등이 모두 고려가 될 수 없다. Fig. 11은 유효입경 별 V/λ 를 도식화한 그래프이다. 실험 및 이론식을 통해 폐색 효과를 대표할 수 있는 인자인 V/λ 값과 유효입경과의 관계에서 임의의 선형관계가 뚜렷하게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 특히 시료 B ($D_{10} = 2.60$ mm)와 시료 C ($D_{10} = 2.80$ mm)사이에는 유사한 입경임에도 거동의 차이가 분명함을 알 수 있다. 이는 유효입경 외에 지반 특성 및 슬러리 흐름 특성의 상이성으로 인해 필터계수 및 유속의 변화가 생기는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 Krause (1987)가 제안한 슬러리 쉴드 적용범위보다 큰 유효입

Table 4. Safety effective grain size (D_{10}) during slurry injection

	Effective grain size D_{10} (mm)	
	Steady state	Machine advance
Slurry only	1.00 (Krause suggestion)	1.00 (Krause suggestion)
Slurry with carbon dioxide gas	2.60	2.61
Slurry with carbon dioxide and #20~#40 5% sand	3.07	3.09

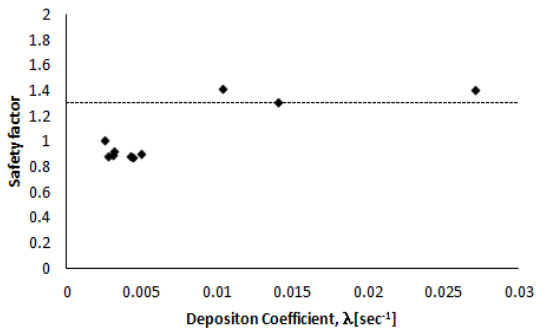
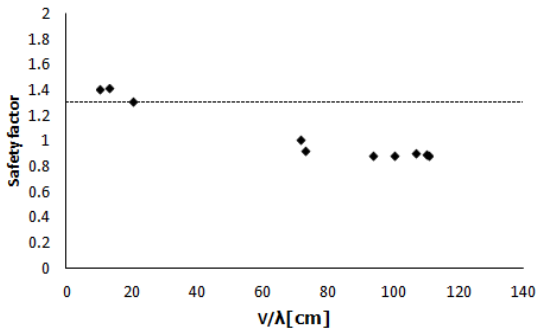


Fig. 12. Face safety factor vs. Filter coefficient

Fig. 13. Face safety factor vs. V/λ

경에 탄산을 첨가하여 굴진면의 안정성을 확보할 경우에는 필터계수 및 V/λ 에 의한 적용성을 고려해야함을 알 수 있다.

이에 따라 굴진면 안정성 평가에 주요한 인자인 필터계수 및 V/λ 의 범위에 대해 살펴보았다. 안전율과 필터계수 및 V/λ 의 관계를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 그래프를 살펴보면 폐쇄 효과를 수치화할 수 있는 필터계수 및 V/λ 와 같은 계수들이 굴진면의 안정성을 대변할 수 있다. 따라서 멤브레인 모델에서의 안전율 1.5를 기준으로 안전율 1.3일 때의 경계를 안정과 불안정의 경계로 보았을 때 필터계수는 약 0.007 sec^{-1} 이상에서 V/λ 는 약 30 cm 이하의 값에서 굴진면은 안전하다.

5. 결론

본 연구에서는 탄산을 첨가한 슬러리 실드 터널에서의 슬러리 침투 거동과 굴진면 안정성을 평가하는데 목적이 있다. 4가지 종류의 시료에서 각기 다른 종류의 슬러리를 주입함으로써 유출량 곡선, 퇴적량 곡선, 침투 곡선 등을 구하여 침투 메커니즘을 분석하였으며, 침투깊이에 따라 감소하는 지보압을 적용하여 굴진면 안정성을 평가해 새로운 슬러리 실드 터널의 적용 범위를 제안하였다.

1. 슬러리 실드 터널의 적용성이 어려운 지반 조건을 모사한 시료 4가지를 통해 슬러리를 주입실험을 실시하고, 이를 통해 필터계수와 간극유속과 필터계수의 비 V/λ 를 산출할 수 있다. 탄산을 첨가한 슬러리 주입 시 폐쇄 효과가 증진하게 되면 필터계수가 증가하고 V/λ 는 감소하는 양상을 보인다. 이러한 양상으로 탄산 및 첨가제 혼입에 의한 굴진면의 안정성 향상을 판단할 수 있다.
2. 실내 실험 결과 탄산을 첨가하였을 경우 굴진면이 안정하게 되는 지반의 최대 유효입경은 2.60 mm으로 향상된다.
3. 지반의 간극이 과다하여 탄산가스에 의한 효과조차 기대할 수 없는 지반에서는 추가적인 첨가제로 흙 입자를 혼입한 결과 굴진면이 안정할 수 있는 최대 유효입경이 3.07 mm로 증가하였다.
4. 슬러리 실드 터널의 적용 범위로 새롭게 제안된 최대 유효입경은 실제 지반의 특성 및 슬러리의 유동학적 특성을 모두 고려할 수 없다. 따라서 이러한 특성이 반영된 인자인 필터계수(λ) 및 V/λ 를 함께 고려함으로써 굴진면의 안정성을 확보할 수 있으며 필터계수는 약 0.007 sec^{-1} 이상, V/λ 는 30 cm 이하의 값에서 양호한 안정성을 확보할 수 있다.
5. 굴진율을 고려하여 굴진면 안정성을 평가하였을 경우 침투깊이는 최대 11% 증가하고, 안전율은 최대 7% 가량 증가한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술 개발” 연구비지원(10기술혁신E09)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, I.M., Lee, S., Cho, K.H. (2004), “Face stability assessment of slurry-shield tunnels”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 20, No. 6. pp. 95-107.
2. Anagnostou, G., Kovari, K. (1994), “The face stability of slurry-shield-driven tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.
3. Fritz, P. (2007), “Additives for slurry shield in highly permeable ground”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 81-95.
4. Gruesbeck, C., Collons, R.E. (1982), “Entrainment and deposition of fine particles in porous media.”, *Society of petroleum Engineers Journal*, December, pp. 847-856.
5. Krause, T. (1987), “Schildvortreib mit flüssigkeits-und erdgestützter ortsbrust”, PhD thesis, *Technischen Universität Carolo-Wilhelina, Braunschweig*.
6. Reddi, L.N., Bonala, M.V.S. (1997), “Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 12, pp. 1143-1152.
7. Xanthakos, P.P. (1979). “Slurry walls”, McGraw-Hill.