

슬러리 쉴드 터널의 막장 안정성 평가 - 슬러리의 폐색효과를 중심으로 -

Face Stability Assessment of Slurry-shield Tunnels - Concentrating on Slurry Clogging Effect -

이 인 모¹ Lee, In-Mo
이 샘² Lee, Sam
조 국 환³ Cho, Kook-Hwan

Abstract

In this paper, the rheological characteristics of slurry used for slurry-shield tunnels were studied with emphasis on penetration characteristics. The slurry penetration was modeled by soil-filter clogging theory. The coefficient of particle deposition was suggested as an indicator of slurry clogging during tunnel construction and calculated through model tests. The measured slurry weight, clogged in the base soil, was compared with the value obtained from clogging theory. Based on the testing results, a stability analysis of a tunnel face was performed to pinpoint the most influential factor affecting stability of slurry-shield tunnels. It was found that the stability of tunnel face is dependent on the ratio of infiltration velocity to the coefficient of particle deposition, and the penetration distance of slurry increases with the ratio of infiltration velocity to the coefficient of particle deposition. Since the stability of tunnel face decreases with the slurry penetration distance, it was necessary to add some additives in order to reduce the slurry penetration distance. It was found that the ground condition needs additives when the soil has the effective particle diameter(D_{10}) larger than 0.75mm. It was also found that the tunnel face stability due to slurry penetration is significantly affected by the tunnel advance rate.

요 지

슬러리 쉴드 터널에서 슬러리 침투의 유동학적 특성은 막장안정성 측면에서 중요하다. 특히, 슬러리의 침투는 막장 안정성에 큰 영향을 미치며, 본 연구에서 이런 유동학적 특성을 파악하기 위하여 흙-필터의 폐색이론을 적용하였다. 터널시공 도중 슬러리 폐색의 지표로 필터계수를 사용하였으며, 실내실험을 통해 이의 적용성을 규명하였다. 실내실험의 결과를 바탕으로 한 안정해석 결과, 막장안정성은 침투속도와 필터계수의 비율에 영향을 받음을 알 수 있었다. 또한, 슬러리의 침투깊이는 침투속도와 필터계수의 비율과 함께 증가하는 경향을 보였다. 막장안정성은 침투거리가 증가하면 감소하는 경향을 보였으며, 침투거리를 줄이기 위하여 슬러리에 첨가제를 첨가하였다. 실험에 근거한 분석 결과 첨가제가 필요한 한계 유효입경(D_{10})은 약 0.75mm임을 알 수 있었다. 슬러리 침투로 인한 막장 안정성은 터널공사시의 굴진속도에도 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

Keywords : Face stability, Rheological characteristic, Slurry, Slurry-shield tunnel

1 정희원, 고려대학교 공과대학 사회환경 시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr)

2 (주)다산컨설팅 지반공학부 사원 (Dept. of Geotechnical Engrg., Dasan Consultant)

3 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원 (Senior Researcher, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea Univ.)

1. 서론

이수 가압식 실드 공법은 슬러리에 압력을 가함으로써 막장 지보압을 유지하는 공법이다. 따라서 슬러리의 침투양상은 슬러리 실드 터널의 막장 안정성에 가장 큰 영향을 미친다. 슬러리는 경제나 환경적인 측면에서도 무시할 수 없는 문제이다. 슬러리가 지반으로 침투하고 지표면으로 나오면, 경제적인 손실과 환경피해를 유발함은 물론 막장 안정성 측면에서도 좋지 않다.

Hutchinson(1975)는 지중연속벽에서 벤토나이트 슬러리의 특성에 대해 심도있게 연구하였으며, Xanthakos(1979)는 슬러리의 전반적인 내용을 연구한 바 있다. Henry(1998)는 벤토나이트 슬러리가 지반과의 경계면에서 생성되는 필터케익의 원리와 특성에 대해 연구하였다.

슬러리 자체의 특성이외에도 슬러리 실드 터널에서 슬러리 특성을 연구한 실적이 있다. 박(1993)은 사질지반에 대한 이수 가압식 실드 공법에서 슬러리(slurry)의 필요성에 관한 연구를 하였다. 박(1993)은 슬러리 흐름에 약액주입에서 이용하는 GR치(Groutability) 개념을 부가함으로써, 실드 굴진시 대상지반에 대해서 과잉간극수압의 발생을 억제할 수 있는 슬러리에 대한 연구를 수행하였으며, 연구결과 GR치가 14~17정도가 되도록 배합하면 과잉간극수압의 발생량을 억제할 수 있다고 제시하였다. Fritz(2002)는 조립질 지반에서 이수 가압식 실드 공법을 사용하기 위한 개선된 슬러리(modified slurries)를 제시하였다. 개선된 슬러리는 40kg의 벤토나이트, 0.5kg 폴리머, 100kg의 모래, 20kg의 vermiculite를 섞어서 만든 것이며, 실제 공사에서도 그 효과를 보여준 것으로 보고하였다.

적절한 슬러리의 사용은 막장의 폐색을 유도하며, 그로 인한 막장 안정성을 확보하기 위해서 보다 많은 터널 막장에서 슬러리 거동에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 막장면에서 슬러리 거동과 조립질 지반에서 발생하는 슬러리의 침투를 최소화하기 위해 일정크기의 첨가제를 추가한 슬러리 거동을 폐색효과를 중심으로 연구하였다.

최근에 국내에서 슬러리 실드 터널 공법을 이용하여 시공한 사례가 있었으며 차츰 시공사례가 늘어날 것으로 전망된다. 하지만, 슬러리 실드 터널의 적용 가능한 지반에 대한 명확한 기준이 없기 때문에, 무분별하게 시공공법을 선정할 우려가 있다. 본 연구는 슬러리 실드 터널의 적용 가능한 지반에 대한 기준을 설정하는데 있어서 도움을 주고자 함을 그 목적으로 하고 있다.

2. 슬러리 실드 터널

그림 1은 슬러리 실드 터널의 개략도를 나타낸 것이다. 이 공법은 굴착실과 슬러리 처리 플랜트를 송니관(slurry feeding pipe)과 배니관(slurry discharging pipe)에 접속하여 이 관로를 통하여 슬러리를 펌프로 환류하게 된다. 압력은 굴착면의 간극수압보다 10~20kPa 정도 큰 압력을 가하고, 적정한 농도(비중 1.05~1.3)의 슬러리에 의해 굴착면의 붕괴와 용수를 방지하여 굴착면을 안정시킨다. 커터로 굴착하고 슬러리에 혼합된 굴착토사를 관로에 의해 갱외로 반출한다. 갱외에서는 배니수의 처리와 송니수의 조정을 행한다.

막장안정은 토압 및 수압과 챔버 내의 슬러리 압력을 조절하여 균형을 유지함으로써, 지반교란을 최소화 할 수 있다. 그러나 이러한 균형이 깨지면 지반 침하나 용기가 발생하여 막장이 불안정하게 된다. 슬러리 실드 터널의 막장안정성 평가는 Anagnostou와 Kovari(1994)에 의해 연구된 바 있으며, 이를 바탕으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

2.1 멤브레인 모델(Membrane Model)

슬러리의 압력은 막장 안쪽으로 밀려들어오는 토압 및 수압을 버텨야하기 때문에 지반의 간극수압 보다 커야 한다. 압력 차이 ΔP 는 막장면에 작용되는 토압에 대응하는 압력이며, 이를 막장지보압이라고 한다.

이 막장의 지보압은 주로 지반으로 유입되는 슬러리의 침투정도에 의해 크게 좌우된다. 그림 2와 같이 침투정도가 미약하여, 막장의 경계면이 얇은 불투수막에 의해 덮인 것처럼 거동하는 경우를 멤브레인 모델이라 한다. 멤브레인 모델에서의 소요 막장 지보압은 최소한의 압력을 필요로 한다. 하지만, 슬러리가 지반으로 침투하면 막장

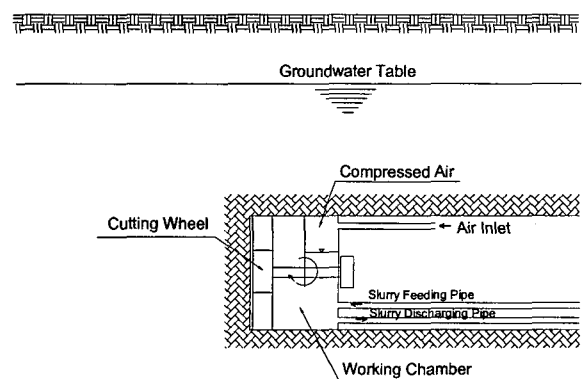


그림 1. 슬러리 실드 터널의 개략도

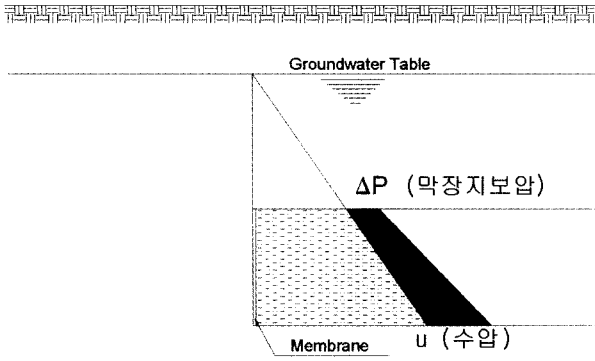


그림 2. 멤브레인 모델

안정을 유지하기 위한 지보압은 훨씬 커야한다. 멤브레인 모델에 근거하여 막장의 안정성에 필요한 소요 지보압을 구하는 메커니즘을 Anagnostou와 Kovari(1994)가 제시한 바 있다. 그들의 분석결과에 의하면 사질지반과 같은 내부마찰각이 30°보다 큰 경우에는 지하수위 높이나 지표면으로부터 터널까지의 심도에 관계없이 소요압 $\Delta P=20\text{kPa}$ 정도임을 밝혔다.

2.2 지반으로 슬러리 침투시 안정성 평가

슬러리가 지반으로 유입되면, 지보력(support force)은 침투로 인하여 점점 감소하게 된다. Anagnostou와 Kovari(1994)에 의하면 침투거리에 따른 지보력은 식 (1)과 같이 감소한다고 제시 하였다.

$$\frac{S}{S_0} = 1 - \frac{e}{2 \cdot D \cdot \tan \omega} \quad (e < D \cdot \tan \omega \text{ 일 때}) \quad (1a)$$

$$\frac{S}{S_0} = \frac{D}{2 \cdot e \cdot \tan \omega} \quad (e > D \cdot \tan \omega \text{ 일 때}) \quad (1b)$$

여기서, e 는 슬러리의 침투깊이이며, S_0 는 멤브레인 모델에서의 지보력($\Delta P \times$ 터널단면적)이며, ω 는 Anagnostou와 Kovari(1994)가 제안한 슬라이딩 메커니즘 단면에서의 슬라이딩 각도이다. 또한 S 는 e 의 슬러리 침투가 발생되었을 때의 지보력으로서 지보효과가 감소함을 보여주고 있다.

3. 폐색이론

3.1 서론

2장에서 서술한 바와 같이 슬러리의 침투깊이가 깊어질수록 지보력이 감소하므로 슬러리의 안정성에 가장 절

대적인 영향을 미치는 것은 슬러리의 지반에 대한 폐색(clogging)효과이다. 지반의 표면에서 폐색이 발생하여(이를 'blinding' 현상이라 함) 필터케이크가 형성된다면, 이는 멤브레인 모델로서 가장 이상적이 될 것이다. 3장에서는 Reddi와 Bonala(1997)가 제안한 폐색이론을 이용하여 슬러리 실드에 이용되는 현탁액의 침투에 대한 기본 메커니즘 밝히고, 특히 현탁액에 잔골재의 첨가제를 첨가하여 폐색효과를 증가시키기 위한 기본이론을 제시하고자 한다.

3.2 이론해

다음 그림 3과 같이 일정한 농도 C_i 를 가진 현탁액을 지반(필터)에 흘려보낼 때, 지반(필터)에서 발생하는 슬러리 입자의 퇴적이론을 소개하면 다음과 같다.

단위부피에서의 입자를 고려하면 입자유동에 관한 지배방정식은 다음과 같다(Gruessbeck과 Collins, 1982).

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

여기서, nC 는 필터단위부피당 현탁액 속의 입자 부피, $n_i C$ 는 필터단위부피당 퇴적입자의 부피, C 는 간극수 내의 세립자 농도, n_i 는 초기간극률, n 는 입자퇴적후의 간극률, σ 는 단위간극부피당 퇴적된 입자의 양, v 는 Darcy의 속도, z, t 는 공간, 시간의 좌표이다. 식 (2)는 입자의 이탈과 퇴적이 동시에 일어날 경우의 식으로서 다음 식과 같이 간략히 표시될 수 있다.

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

여기서, V 는 간극 내 유속(v/n)이다.

식 (3)에서 세 번째 항은 입자의 이탈 및 퇴적에 관련된 항인데, 여러 학자들이 제안한 식들 중에서 $\partial \sigma / \partial t = \lambda C$ 라는 식을 이용하고 지반(필터)에서의 퇴적현상만을 고려한다면, 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda C = 0 \quad (4)$$

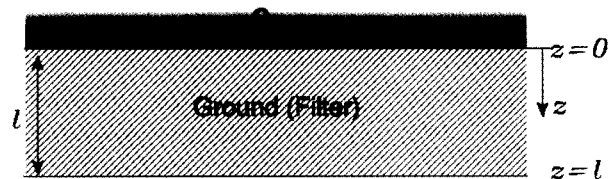


그림 3. 상부 흙모체를 제거했을 때의 필터 개념도

$$\partial\sigma/\partial t = \lambda C \quad (5)$$

여기서, λ 는 필터계수(particle deposition coefficient)이다.

식 (4)는 흙모체에서의 입자퇴적에 관한 지배방정식이다. 이 식은 편미분방정식이므로, 다음과 같은 특성함수(characteristic function)를 이용하여 상미분 방정식으로 변환할 수 있다.

$$C(z, t) = C_i e^{-\lambda z/V} U\left(t - \frac{z}{V}\right) \quad (6)$$

식 (6)의 $C(z, t)$ 를 식 (5)에 대입하여 정리하면, 단위간극부피당 세립분의 퇴적량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma(z, t) = \lambda C_i e^{-\lambda z/V} \left(t - \frac{z}{V}\right) \quad (7)$$

$\sigma(z, t)$ 는 단위간극부피당 퇴적량이기 때문에 필터층에 퇴적한 세립분의 총무게는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W(z, t) = \int_0^z \sigma(z, t) \cdot A_v dz \quad (8)$$

여기서, A_v 는 간극면적($A \cdot n$)이다.

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 간극 내에 퇴적하는 세립분의 무게는 다음과 같다.

$$W(z, t) = \int_0^z \lambda C_i e^{-\lambda z/V} \left(t - \frac{z}{V}\right) \cdot A_v dz \quad (9)$$

식 (9)를 적분하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을

수 있다.

$$W(z, t) = \left(\frac{z}{V} \exp\left(-\frac{\lambda z}{V}\right) + \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{\lambda z}{V}\right) - t \exp\left(-\frac{\lambda z}{V}\right) + t - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot V \cdot C_i \cdot A \cdot n \quad (10)$$

실험을 통해서, z, V, A, n, C_i, t 와 $W(z, t)$ 를 알 수 있기 때문에, 이 값들을 식 (10)에 대입하여 정리하면, 모형실험의 결과를 이용해서 필터계수를 구할 수 있다. 또한 실험으로 구한 필터계수를 식 (7)에 대입하면, 실제 측정된 단위간극당 퇴적량과 계산에 의한 값을 비교 및 분석할 수 있다.

4. 모형실험

4.1 실험 장비 구성

그림 2에서 필터층은 지반으로 묘사하고, 현탁액은 슬러리 실드터널에서 슬러리로 묘사할 수 있다. 이를 바탕으로 폐색효과를 파악하기 위한 모형실험을 실시하였다. 모형실험에서 사용한 벤토나이트 농도는 주문사의 경우 2~6%였다. 또한 시료 A와 B는 투수성이 너무 좋아 6% 이상의 벤토나이트 슬러리와 필요시 첨가제를 사용하였다. 그리고 첨가제를 바꾸어 가면서 실험을 실시하여 첨가제 추가로 인한 폐색효과를 관찰하였다.

실내실험 장비 구성은 총 4부분으로 나눌 수 있으며 그림 4에 실험장비 구성의 개략도를 나타내었다. 첫 번째, 압력 공급 및 제어 부분에서 압력은 컴프레서를 이

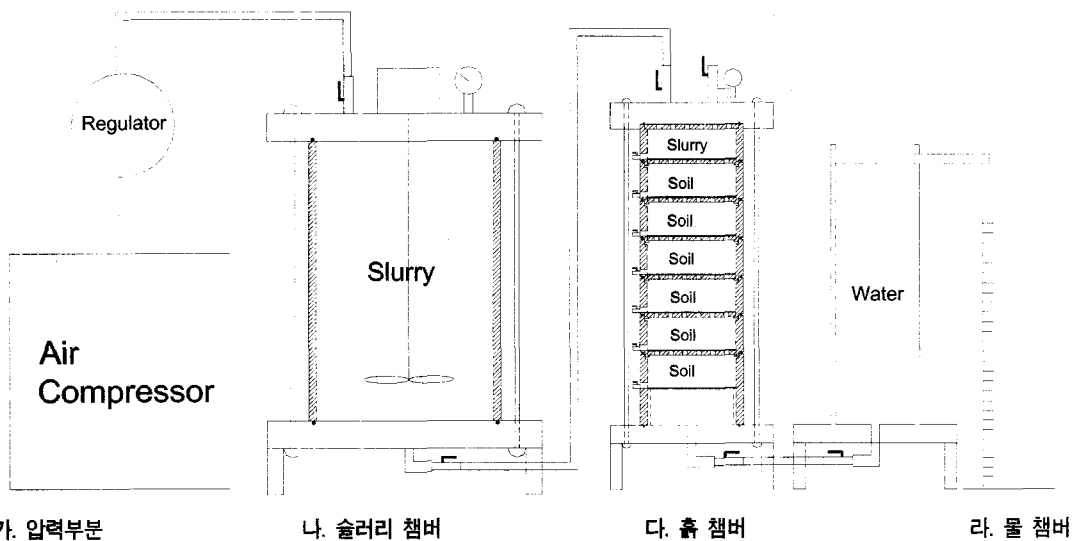
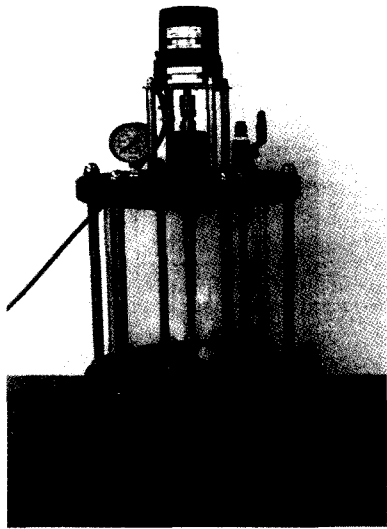


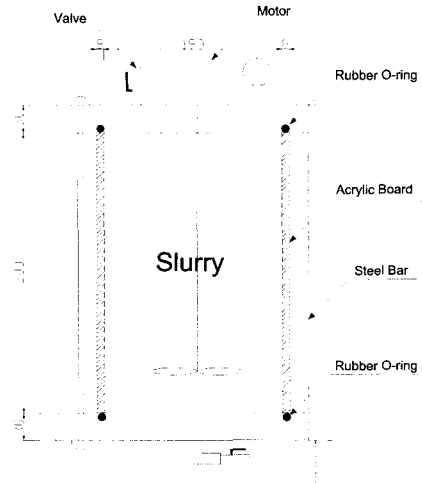
그림 4. 실험 장비 구성

용하여 공급하였고 압력을 일정하게 유지시키기 위해서 레귤레이터를 사용하였다. Anagnostou와 Kovari(1994)의 연구결과에 의해 압력 ΔP 는 20kPa을 사용하였다. 두 번째, 슬러리 챔버부분으로, 그림 5에서 보는 바와 같이 $\phi 190\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 부피를 갖는 아크릴 원형 수조로 구성되어 있다. 슬러리와 첨가제가 부유 상태를 유지하게 하기 위해서 슬러리 챔버 내에 교반기를 설치하였으며, 교반기의 회전 속도는 약 100rpm로 고정하였다. 또, 슬러리 압력을 확인하기 위해서 슬러리 챔버 상부에 압력게이지를 설치하였다. 세 번째, 흙 챔버 부분이다. 흙 챔버는 각 층에서 퇴적한 현탁액의 무게를 측정하기 위해 6개의 작은 챔버로 나누어 구성하였다. 작은 챔버는

$\phi 95\text{mm} \times 32\text{mm}$ 의 부피를 갖는 아크릴로 구성된 원형 실린더이다. 각각의 작은 챔버에는 실험 후 간극 내에 있는 슬러리를 빼기 위해서 밸브를 설치하였다. 그리고 챔버의 바닥에는 시료의 유출을 막기 위해서 표준망을 설치하였는데, 시료 A와 시료 B를 이용한 실험에서는 각 시료의 입자크기가 #40체 보다 크기 때문에 흙 챔버의 바닥에 #40체를 설치하였다. 주문진사는 입자크기가 #100체 보다 크기 때문에 #100체를 바닥에 설치하였다. 챔버의 상부에는 작용하는 압력을 측정하기 위한 압력 게이지가 있으며, 흙 위에는 슬러리를 원활하게 공급하기 위해, 약간의 공간을 유지할 수 있도록 하였다. 그림 6은 흙 챔버의 실제사진과 상세한 단면을 보여주고 있

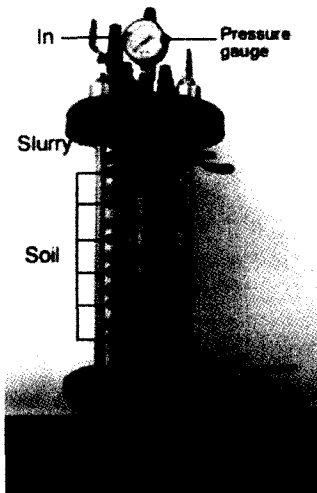


(a) 슬러리 챔버 실제사진

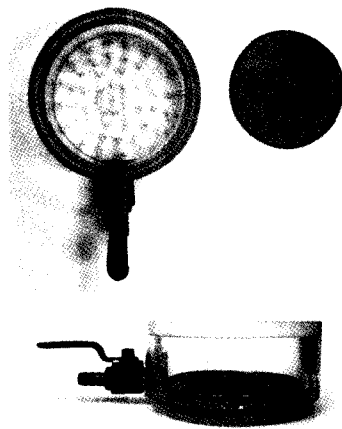


(b) 슬러리 챔버 상세 단면

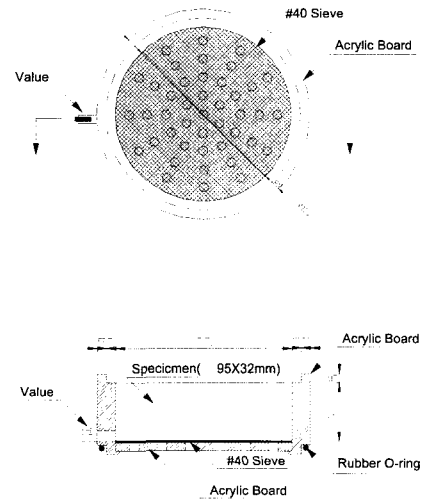
그림 5. 슬러리 챔버의 실제 사진 및 상세단면



(a) 흙 챔버 실제사진



(b) 작은 흙 챔버 실제사진



(c) 흙 챔버 상세 단면

그림 6. 흙 챔버의 실제 사진 및 상세단면

다. 네 번째, 물 챔버 부분이다. 터널 막장에 압력 ΔP 만 가해주기 위해서는, 흙 챔버를 포화시키고 지표면의 위치와 지하수의 수위를 일치시켜야 한다. 왜냐하면, ΔP 만큼의 압력만 지반에 작용시키기 위해서는 수압에 의한 영향을 배제시켜야 하기 때문이다.

4.2 실험과정

실험과정은 다음과 같이 크게 4단계로 나눌 수 있다. 먼저, 사용하고자 하는 벤토나이트 슬러리를 조성한다. 예를 들어, 가장 많이 사용하는 6% 슬러리를 만들고자 하면, 물 100g당 벤토나이트 6g을 섞는다. 슬러리는 믹서기를 이용하여 약 30분가량 교반시킨다. 슬러리의 점성을 증가시키기 위해서 24시간 수화시키기도 하나, 본 실험에서는 교반 후 즉시 사용하였다. 두 번째, 대상 지반의 모델링(ground modeling)으로, 동일한 상태의 지반을 모델링하기 위해서 가장 중요한 것은 건조단위중량을 일정하게 해주는 것이다. 6부분으로 나뉜 흙 챔버(soil chamber)는 모두 직경이 9.5cm, 높이가 3.2cm이며, 부피는 226.8cm³이다. 본 실험에서 사용하는 시료는 모두 조립질이므로, 일정한 양의 시료를 챔버에 넣고 진동을 주어 챔버 내에 가득 차게 함으로써, 건조단위중량을 일정하게 유지하였다. 세 번째, 지하수를 모델링 한다. 지하수위를 모델링하기 위해서, 시료를 포화시켰다. 시료 준비 후 물은 아래에서 위로 공급함으로써, 시료를 완전 포화 시켰다. 시료를 완전히 포화시킨 후 물 챔버(water chamber)와 흙 챔버를 튜브로 연결한 후, 물 챔버를 물로 가득 채워서 지하수위를 모델링 하였다. 이 때, 흙 챔버의 지표면 위치와 물 챔버의 수위는 동일해야 한다. 네 번째, 압력을 공급한다. 압력은 콤프레셔(air compressor)를 통해서 슬러리 챔버에 가하였으며, 이 때, 흙 챔버 위쪽에 설치된 압력계를 확인하면서 압력을 가하였다. 압력은 레귤레이터를 이용해 20kPa로 유지시켰다. 압력을 가함과 동시에 잠갔던 물 챔버와 연결된 밸브를 열어, 슬러리가 지반에 침투할 수 있게 하고, 유출된 양을 측정하였다.

4.3 시료의 종류

벤토나이트 슬러리의 유출특성은 슬러리의 농도와 대상지반의 특성에 따라 크게 달라질 것이다. 기존 문헌에 의하면, 슬러리의 농도가 클수록, 침투거리가 짧고, 대상지반의 입경에 따라 유출특성이 달라진다. 따라서

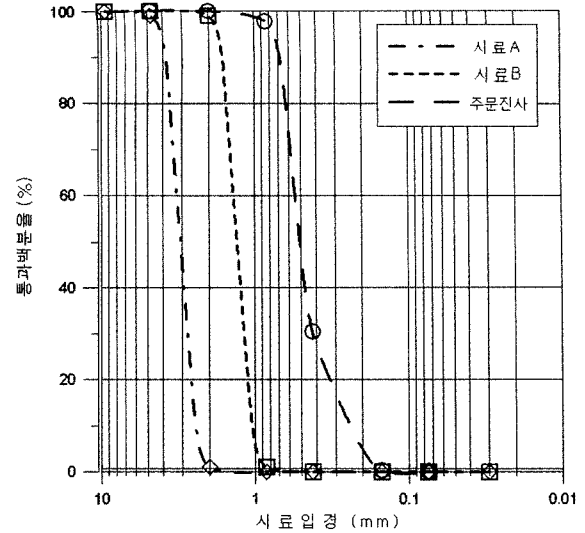


그림 7. 시료별 입도분포 곡선

표 1. 조성된 지반의 물성치

시료 종류	주문진사	시료 A	시료 B
비중, G_s	2.65	2.56	2.56
간극률, n	0.428	0.417	0.417
건조단위중량, γ_d (kN/m ³)	14.81	14.62	14.62
투수계수, k (cm/sec)	9.0×10^{-2}	3.0×10^{-1}	1.3×10^{-1}

본 연구에서는 총 3종류의 시료를 이용하여 실험을 실시하였다. 각각의 시료에 따른 유출특성을 비교하기 위해서, 가장 먼저 모든 시료에 대해서 6% 벤토나이트 슬러리를 사용하여 실험을 실시하였다. 그 후, 각각의 시료에 적절한 농도의 벤토나이트 슬러리를 선정하여 실험을 하였다. 특히, 필요에 따라 벤토나이트 슬러리에 '#40~#100' 사이의 골재나 '#100~#200' 사이의 골재를 1% 첨가하여 첨가제의 폐색특성에 미치는 영향도 검사하였다.

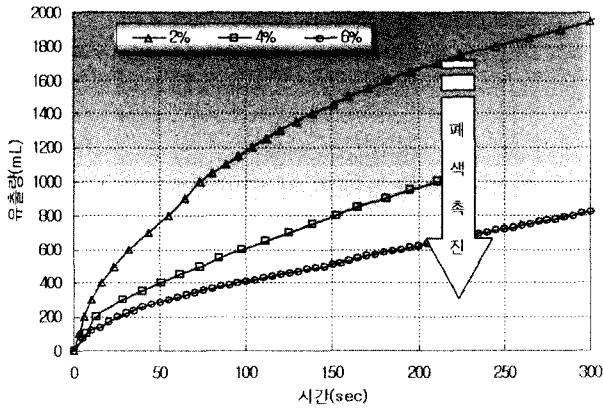
실험에서 사용한 각 시료의 입도분포곡선은 그림 7과 같다. 시료 A는 입도가 크고 투수성이 큰 시료($k=3.0 \times 10^{-1}$ cm/s)로 구성하였으며, 시료 B는 시료 A보다 입도가 작고 투수성도 작은 시료($k=1.3 \times 10^{-2}$ cm/s)로 구성하였다. 또, 주문진 표준사도 지반 구성 시료로 사용하였다. 조성된 각 지반의 물성치는 표 1과 같다.

5. 실험결과

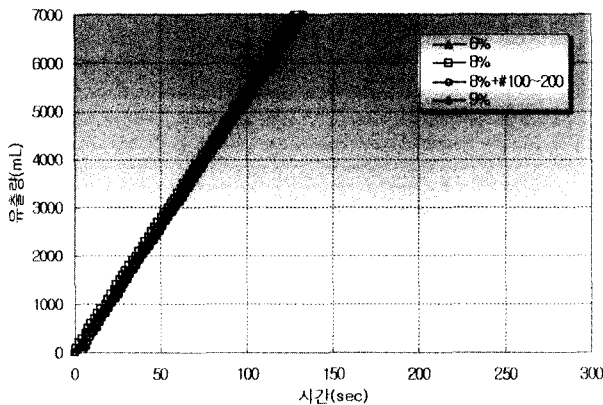
5.1 유출량 곡선

그림 8은 각각의 시료에 슬러리의 조성을 바꾸어 가면

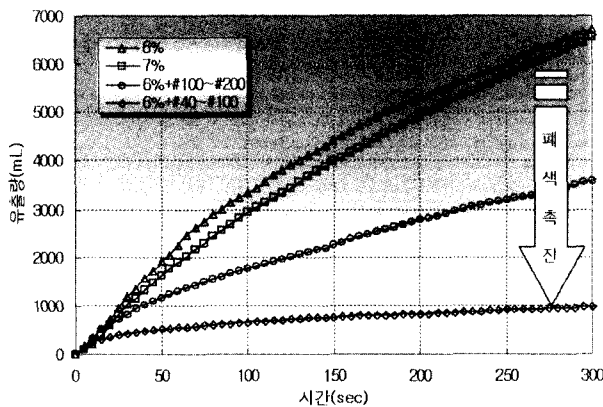
서 실험을 실시한 결과로서 시간에 따른 유출량을 보여 주고 있다. 주문진사를 이용한 모든 실험은 유출량이 매우 작은 것을 알 수 있다(그림 8(a)). 하지만, 시료 A를 이용한 실험은 슬러리의 조성에 상관없이 유출량이 매우 크고 실험에 따른 차이 또한 크지 않음을 알 수 있다(그림 8(b)). 시료 B는 슬러리의 조성에 따라, 상당히 다른 유출특성을 보인다. 특히 1%의 첨가제의 추가로 인한 유출량이 눈에 띄게 감소하는 것을 알 수 있다(그림 8(c)).



(a) 주문진사



(b) 시료 A



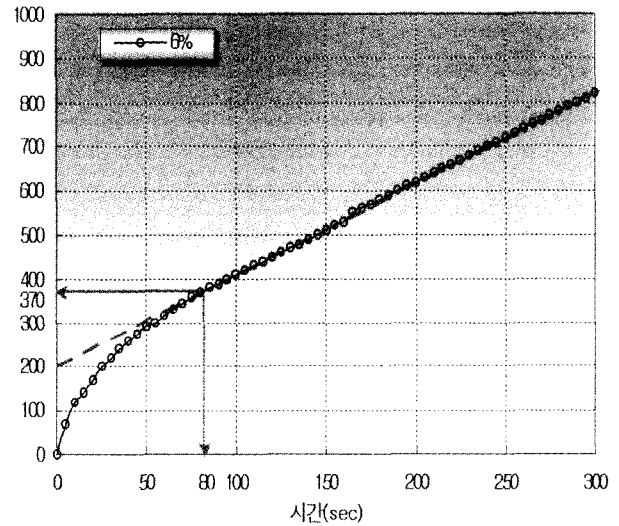
(c) 시료 B

그림 8. 유출량 곡선

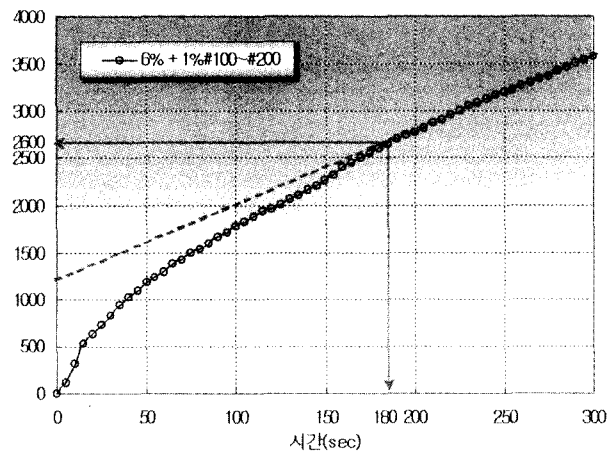
5.2 퇴적량 분포

폐색현상은 간극 내에 입자퇴적으로 발생하기 때문에 대부분 실험 초기에 발생한다. 실험 초기에는 시간당 유출량이 크나, 시간이 지날수록 시간당 유출량이 점점 감소한다. 따라서 폐색현상이 발생하는 시점은 유출량 곡선의 종점에서 점근선을 그어 그 점과 만나는 점으로 정의할 수 있으며, 그림 9에 그 예를 보여주었다.

유출량 곡선으로부터 폐색현상이 발생하는 시점에 유출량과 유출속도를 구할 수 있고, 폐색현상이 발생하기 이후에는 간극 내에 더 이상의 큰 양의 퇴적이 발생하지 않기 때문에 실험이 끝난 후의 퇴적량은 폐색현상이 발생하였을 때의 퇴적량과 같다고 할 수 있다. 이를 토대로 식 (10)을 이용하여 필터계수를 구할 수 있다. 실험을 통해 구한 필터계수의 타당성을 검토하기 위해 식 (7)에



(a) 주문진사, 6% 벤토나이트 슬러리



(b) 시료 B, 6% 벤토나이트 슬러리, 1% #100-200

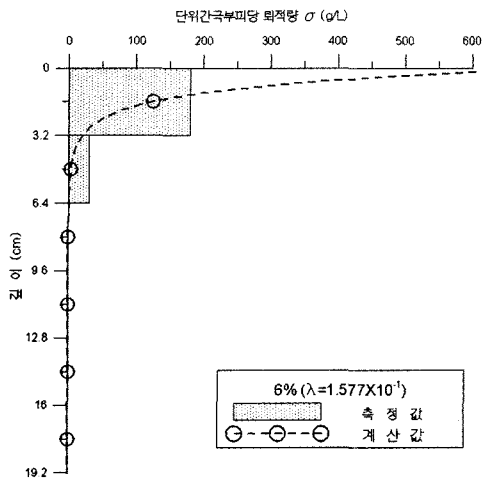
그림 9. 폐색시간 추정(유출량 곡선 상세)

대입하여 예상되는 깊이별 퇴적분포를 그림 10처럼 나타내었다. 깊이별 퇴적분포의 예상값과 깊이별 퇴적분포의 측정값을 비교한 결과는 앞 절에서 제시된 폐색이

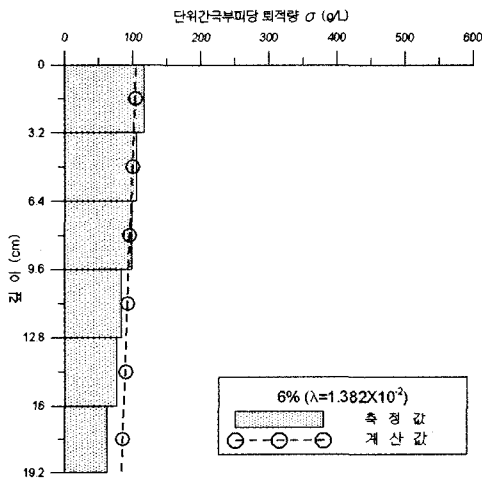
론이 슬러리 침투 메커니즘을 규명하는데 있어서 효율성이 있음을 증명하여 준다.

5.3 침투깊이

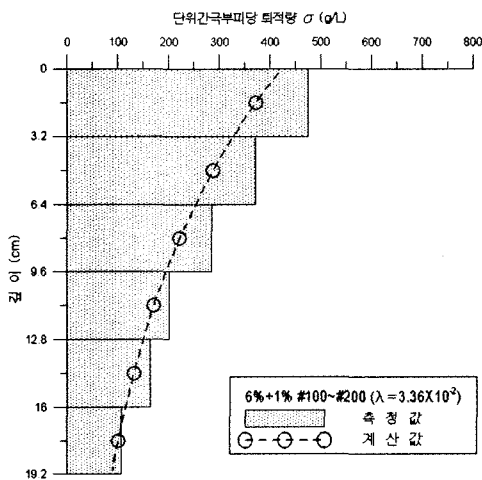
깊이별 단위간극 부피당 퇴적량 곡선에서, 이론적



(a) 주문진사(6%벤토나이트 슬러리)

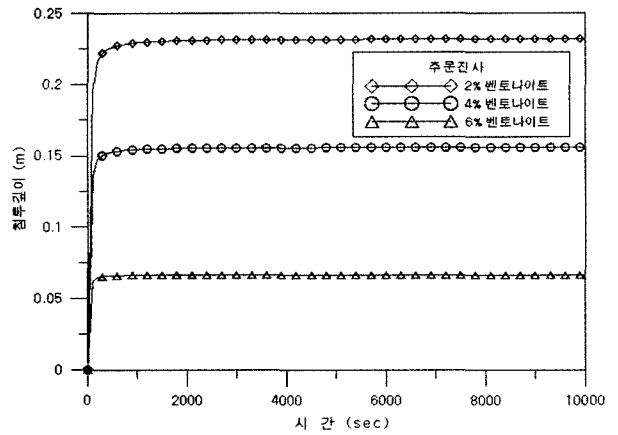


(b) 시료 A(6% 벤토나이트 슬러리)

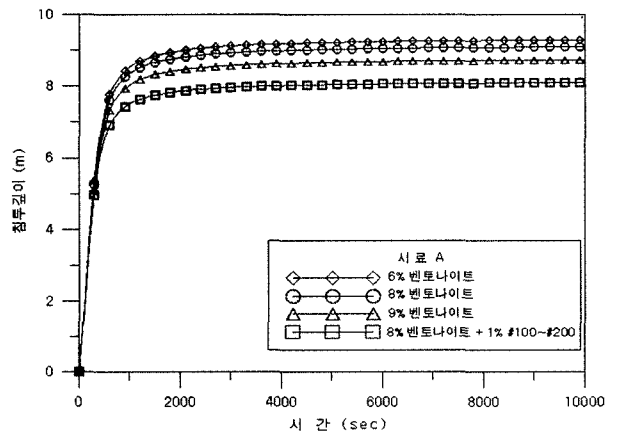


(c) 시료 B(6% 벤토나이트 슬러리, 1% #100~#200 첨가제)

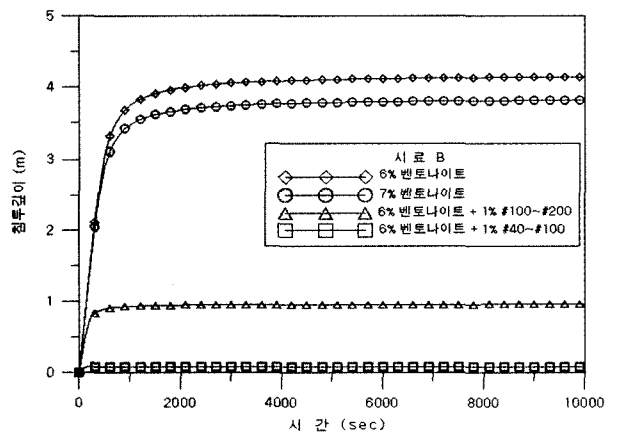
그림 10. 계산값과 실측값 비교



(a) 주문진사



(b) 시료 A



(c) 시료 B

그림 11. 시간에 따른 침투깊이

표 2. 필터계수와 침투깊이

시료 종류	농도 Ci	첨가제	폐색시간 (sec)	유출량 (mL)	유속 V(cm/sec)	퇴적량 W(g)	필터계수 λ(sec-1)	최대침투깊이 (m)	V/λ (cm)
주문진사	2%	-	182	1600	0.29	29.9	8.63×10 ⁻²	0.232	3.36
	4%	-	73	500	0.225	17.26	9.95×10 ⁻²	0.156	2.26
	6%	-	80	370	0.152	20.44	1.58×10 ⁻¹	0.067	0.96
시료 A	6%	-	-	7000	1.872	53.3	1.38×10 ⁻²	9.288	135.5
	8%	-	-	7000	1.85	72.5	1.40×10 ⁻²	9.094	132.6
	9%	-	-	7000	1.795	85.11	1.41×10 ⁻²	8.73	127.3
	8%	1% #100~#200	-	7000	1.777	90.72	1.51×10 ⁻²	8.1	118.1
시료 B	6%	-	-	6730	0.728	101.74	1.20×10 ⁻²	4.145	65
	7%	-	-	6540	0.708	123.68	1.27×10 ⁻²	3.817	57.2
	6%	1% #100~#200	180	2600	0.469	157.95	3.36×10 ⁻²	0.961	14.7
	6%	1% #40~#100	140	745	0.173	60.62	1.39×10 ⁻¹	0.086	1.25

으로는 $\alpha(z, t)$ 가 0인 지점이 침투깊이이나, $\alpha(z, t)$ 는 exponential 함수이므로 0이 될 수 없기 때문에, 침투깊이는 다음을 만족하는 지점으로 설정하였다.

$$\alpha(z, t) = 0.001\sigma_0 \quad (11)$$

여기서, σ_0 는 표면(z=0)에서 단위간극 부피당 퇴적량이다. 다시 말하여, 표면에서의 퇴적량과 비교하여 0.1%의 퇴적량에 불과한 지점을 침투깊이로 가정하였다.

그림 11은 시간 t에서 식 (11)을 만족하는 깊이 z를 구해서, 각 실험의 시간에 따른 침투깊이분포를 나타낸 것이다. 침투깊이는 초기에 급격히 증가하고 시간이 흐를수록 일정한 값에 수렴하는데, 이 때 수렴 값을 최종 침투깊이라 할 수 있다. 각 실험의 결과를 정리하여 표 2에 보였다. 표 2에 의하면 주문진사를 이용한 실험의 최종침투깊이는 모두 30cm이하를 보이며, 시료 A를 이용한 실험은 약 9m의 최종침투깊이를 보인다. 반면, 시료 B를 이용한 실험은 슬러리의 농도나 첨가제의 조성에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 농도 증가나 첨가제 추가가 슬러리의 유출특성에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주는 것을 알 수 있었다. 또, 슬러리의 농도가 증가할수록 필터계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 필터계수 증가하면 침투깊이는 감소한다. 하지만, 침투깊이가 감소하는 정도는 농도를 증가시키는 것 보다는 첨가제를 넣는 쪽이 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다.

6. 막장 안정성 평가

6.1 지보력

그림 12는 막장안정성 평가를 실시할 터널의 단면이다. 지보력은 식 (1)을 이용해서 구할 수 있으며, 앞 절에서 계산한 시간에 따른 침투깊이를 이용하면 시간에 따른 지보력 분포를 구할 수 있다. Anagnostou와 Kovari (1994)은 그림 12와 같은 터널 단면에서 멤브레인 모델의 안전율은 1.5로 제시한 바 있다. 각 경우에 계산한 최종 지보력과 안전율을 정리하여 보면 표 3과 같다. 주문진사를 이용한 실험에서 막장지보력은 멤브레인 모델인 경우와 비교하여 보면 약 99%를 유지하였다. 즉, 멤브레인 모델을 그대로 적용하여도 무방함을 보여준다. 하지만, 시료 A를 이용한 실험에서 막장지보력은 약 20%정도로 크게 감소함을 알 수 있으며, 이 시료의 경우 토립자가 너무 조립질이어서 벤토나이트의 농도를 증가시키거나 첨가제를 삼입하여도 큰 효과가 없음을

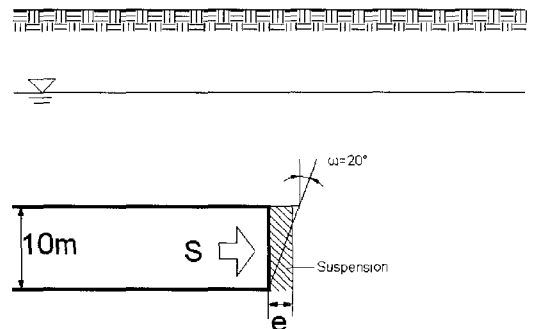


그림 12. 터널단면(Anagnostou와 Kovari, 1994)

표 3. S/S₀값과 안전율

시료종류	벤토나이트 농도	첨가제	S/S ₀ (%)	안전율*
주문진사	2%	-	96.8	1.45
	4%	-	97.7	1.47
	6%	-	99.1	1.49
시료 A	6%	-	19.6	0.29
	8%	-	20	0.3
	9%	-	20.8	0.31
	8%	1% #100~#200	22.5	0.34
시료 B	6%	-	43.9	0.66
	7%	-	47.7	0.72
	6%	1% #100~#200	86.8	1.3
	6%	1% #40호#100	98.8	1.48

*멤브레인 모델 안전율 : 1.5

알 수 있었다. 시료 B를 이용한 실험에서 막장지보력은 유출량 곡선과 침투깊이 분포에서처럼 슬러리의 농도나 첨가제에 따라서 크게 다른 결과를 보임을 알 수 있었다.

6.2 막장안정성과 V/λ의 관계

벤토나이트 슬러리의 농도가 높을수록 유출량, 유출 속도, 최종침투깊이는 감소하고 안전율은 증가하는 경향을 보였다. 이는 필터계수가 커질수록 표면쪽 퇴적량이 증가하여 폐색현상이 촉진되기 때문이다. 그러나 표 2에서 시료 A와 시료 B의 결과를 비교해 보면, 시료 B의 필터계수가 시료 A의 필터계수보다 작아도 안전율

이 오히려 더 크게 나타난다. 따라서 막장안정성은 필터계수만의 함수가 아닌, 유출속도에도 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 유출속도 V와 필터계수 λ를 정규화하여, 안전율과 V와 λ의 비율의 관계를 나타내면 안전율은 막장에서 슬러리의 침투깊이와 관련이 깊고, 막장안정성은 V, λ의 비율에 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 13은 최종침투깊이와 V/λ의 관계를 나타낸다. V가 작으면 슬러리의 침투가 힘들며, λ가 크면 표면쪽 퇴적이 증가하여 폐색현상이 촉진되므로, V/λ가 작을 경우 두 효과가 함께 작용하여 막장의 안정성을 유지하게 된다. 그림 13에서 V/λ가 작을수록 최종침투깊이가 작아서 막장은 안전하고, V/λ가 클수록 침투가 많이 발생하기 때문에 막장은 불안정하게 된다. 한편, 안전과 불안정의 경계를 이루는 최종침투깊이는 약 2.4m이므로, 그림 13에 의해 한계 V/λ는 약 36cm임을 알 수 있다.

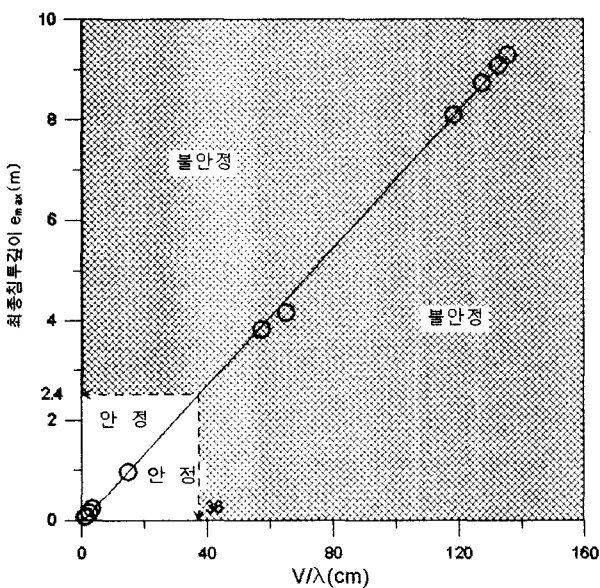


그림 13. 최대 침투 깊이 e_{max}와 V/λ

6.3 유효입경(D₁₀)과 안정성의 관계

슬러리의 유동특성은 벤토나이트 슬러리의 종류에 의해 크게 영향을 받는다. 즉, 벤토나이트 슬러리의 종류에 따라 막장 안정성은 크게 달라진다. 또한 막장안정성은 지반의 투수특성에 의해 크게 좌우된다. Anagnostou와 Kovari(1994)의 연구결과에 의하면 지반의 투수 특성은 대상지반의 유효입경 D₁₀과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문은 실험결과를 바탕으로 D₁₀과 막장안정성과의 상호관계를 제시하였다. 그림 14는 6% 벤토나이트 슬러리를 사용하였을 때, 유효입경 D₁₀과 최종침투깊이 e_{max}의 관계를 보인 것이다. 그림 14에 의하면, 대상지반의 D₁₀이 클수록, 투수성이 크기 때문에

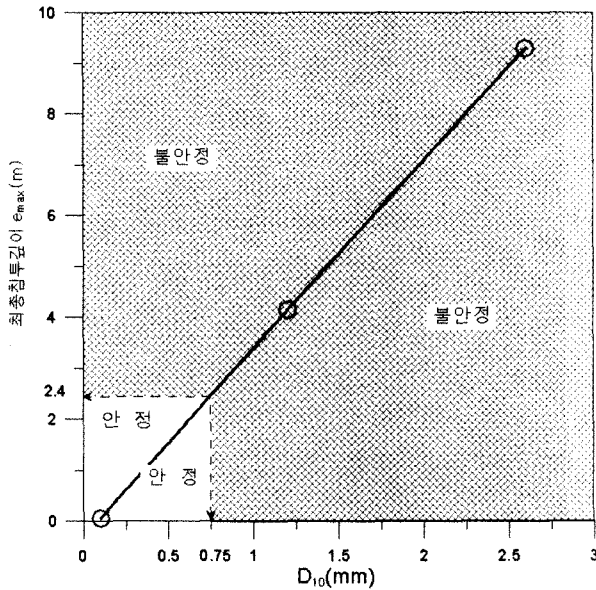


그림 14. 유효입경(D₁₀)과 최종침투깊이와의 관계(6% 벤토나이트 슬러리)

최대 침투깊이는 증가한다. 즉, D₁₀이 클수록 불안전함을 알 수 있다. 한계 침투 깊이가 약 2.4m이므로, 6% 벤토나이트를 사용할 경우 안전측과 불안전측의 경계가 되는 D₁₀은 약 0.75mm이다. 따라서 6% 벤토나이트를 사용할 경우, D₁₀이 0.75mm이상인 지반은 첨가제를 추가하여 막장안정성을 증가시켜야 할 것이다.

6.4 굴진율을 고려한 안정성 해석

Anagnostou와 Kovari(1994)는 슬러리의 침투속도 de/dt 를 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$\frac{de}{dt} = C \cdot \left(\frac{e_{\max}(z) - e(z, t)}{e(z, t)} \right) \quad (12)$$

여기서, C는 대상지반의 특성과 슬러리의 특성을 보여주는 상수이다.

일정한 굴진율로 굴착을 하는 터널에서, 침투속도 de/dt 와 굴진율 u 은 시간이 지나면 같아진다. 이런 의미에서, 한계굴진율 u_{cr} 은 $e = e_{cr}$ 에서 침투속도 de/dt 와 같다.

$$u_{cr} = (de/dt)_{e=e_{cr}} \quad (13)$$

실험에 사용한 시료의 길이가 0.192m이므로, $e(z, t)$ 가 0.192m일 때 유출속도 de/dt 를 구할 수 있으므로, 각 실험에 해당하는 침투속도 방정식을 구할 수 있다. 그림

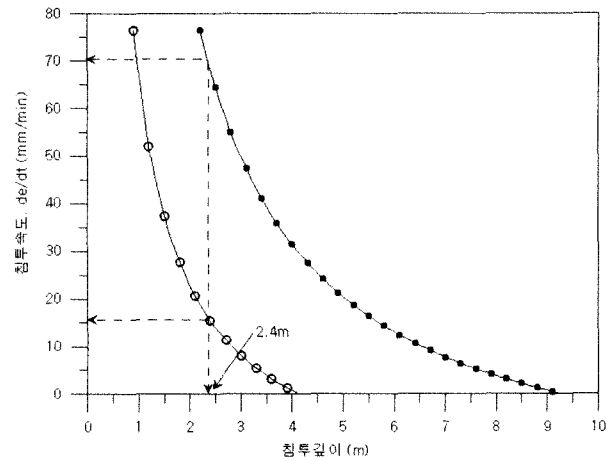


그림 15. 침투거리와 유출속도

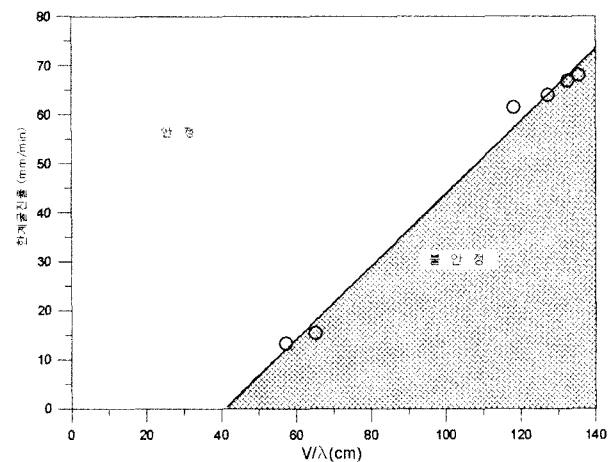


그림 16. 굴진율과 V/λ의 관계

15은 V/λ 가 65와 132.6인 두 경우의 침투거리와 침투속도의 관계 방정식을 나타낸 것이다. 한계침투거리는 2.4m에 표시하였으며, 이 때 침투거리를 구함으로써 한계굴진율을 구할 수 있다.

본 연구에서 시행한 실험 중, 한계침투거리 이상으로 침투한 경우에 한해 한계굴진율을 구할 수 있으며, 굴진율과 V/λ 와의 관계를 그림 16에 제시하였다. 그림 16을 보면 한계굴진율은 V/λ 의 함수임을 알 수 있다. 또한 굴진율이 20mm/min일 때, 한계 V/λ 는 약 70cm임을 알 수 있다. 굴진율을 고려하여 안정성 해석을 실시할 경우, 굴진율을 고려하지 않은 경우보다 더 높은 안전율이 산정되었다. 이는 슬러리의 침투거리가 굴진속도에 의해서 점점 짧아지기 때문일 것으로 사료된다.

6.5 슬러리 쉴드 터널의 막장안정성

그림 17은 모든 실험 결과를 바탕으로 종합적인 분석

을 위해 도출한 그래프이다. 먼저, 곡선 1과 곡선 2는 각각 6%와 7% 벤토나이트 슬러리를 이용한 실험 결과이다. 곡선 2는 시료 A($D_{10}=2.6\text{mm}$)에 대하여 실험결과에서 6% 벤토나이트 슬러리와 8% 벤토나이트 슬러리를 이용한 실험결과의 V/λ 가 각각 135.5와 132.6이므로, 7% 벤토나이트 슬러리를 이용할 경우 V/λ 는 이 두 값의 중간 값인 134로 가정하여 나타낸 것이다. 곡선 3은 6% 벤토나이트 슬러리에 1% #100~#200의 첨가제를 넣은 경우의 결과이다. 시료 A의 경우 6% 벤토나이트 슬러리를 사용한 경우와 8% 벤토나이트 슬러리를 사용한 실험의 결과가 크게 다르지 않기 때문에, 6% 벤토나이트 슬러리에 1% #100~#200의 첨가제를 넣은 실험결과는 8% 벤토나이트 슬러리에 1% #100~#200의 첨가제를 넣은 실험결과와 크게 다르지 않다고 가정하였다.

그림 17은 수평축 절편 값은 해당 슬러리를 사용하였을 때, 멤브레인이 형성될 수 있는 최대 유효입경 D_{10} 을 의미한다. 곡선 1의 수평축 절편 값은 약 0.1mm 이고, 곡선 2의 수평축 절편 값은 약 0.2mm이다. 즉, 7% 벤토나이트를 사용할 때, 지반의 유효입경 D_{10} 이 0.2mm보다 작으면 슬러리의 침투는 거의 발생하지 않고, 경계면에 불투수막이 형성된다. 농도가 높을수록, 첨가제를 넣을수록, 멤브레인을 형성하는 최대 유효입경 D_{10} 은 점점 커진다. 곡선 1, 곡선 2와 곡선 3의 수평축 절편 값을 비교해보면, 현탁액의 농도 증가는 멤브레인을 형성하는 시료의 범위를 넓혀주는 효과가 있다는 것을 알 수

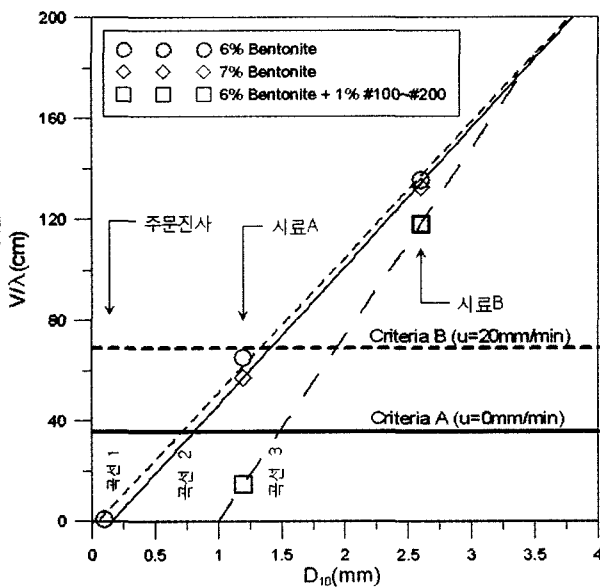


그림 17. D_{10} , 굴진율과 V/λ 값과의 관계

있다.

그림 14에서 한계 V/λ 는 약 36cm이었다. 그림 17에서 Criteria A는 그림 14에서 구한 한계 V/λ 를 나타낸 것이다. 이 값은 굴진율을 고려하지 않은 해석으로 구한 한계 V/λ 이다. Criteria A를 기준으로 안전과 불안전의 경계를 설정하고, 곡선 1, 곡선 2와 곡선 3을 비교하면, 각각의 슬러리로 막장의 안정을 유지할 수 있는 지반의 D_{10} 경계조건은 각각 0.75mm, 0.8mm, 1.5mm임을 알 수 있다. 특히, 곡선 1과 곡선 2사이의 한계 D_{10} 증가율은 곡선 1과 곡선 3사이의 한계 D_{10} 증가율보다 현저히 작음을 보여주고 있다. 곡선 2는 곡선 1에 벤토나이트 농도를 1% 증가시킨 경우의 결과이고, 곡선 3은 곡선 1에 첨가제 1%를 추가하여 얻은 결과이다. 따라서 첨가제의 추가가 벤토나이트 농도의 증가보다 적용 가능한 지반의 범위를 더 넓혀준다는 것을 알 수 있다.

Criteria B는 굴진율($u=20\text{mm/min}$)을 고려한 해석 시, 그림 16에 의해 구한 한계 V/λ 의 값을 그림 17에 적용하여 막장의 안전과 불안전 경계면을 설정한 것이다. Criteria B와 곡선 1, 곡선 2, 곡선 3에 의해서, 한계 D_{10} 을 구하면, 각각 1.2mm, 1.3mm, 1.9mm이다. 이는 Criteria A를 적용했을 때 구한 한계 D_{10} 보다 약 7%씩 증가한 것이다. 즉, 굴진율을 고려한 해석이 더 안전함을 알 수 있다. 한편, 굴진율 u 가 20mm/min보다 크다면 경계면은 Criteria B보다 더 위에 존재하게 된다. 그럴 경우, 안전과 불안전의 경계 D_{10} 이 커지게 된다. 따라서 굴진율이 클수록 적용 가능한 지반의 범위가 넓어짐을 알 수 있다.

7. 결론

터널 막장면에서의 슬러리 침투에 따른 막장안정성을 검토하기 위하여 슬러리에 대한 폐색효과에 대한 모형실험을 실시하였으며, 실험 결과를 이론해와 비교 검토하였다. 특히 잔골재에 대하여 첨가제로 인한 폐색증진효과를 집중적으로 검토하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 실험을 통해 구한 필터계수 λ 를 이용하여 침투거리를 예측할 수 있었고, 막장지보압을 계산하여 침투거리에 따른 막장 안정성을 유추할 수 있었다. 직경이 10m인 터널의 경우, 막장의 안전과 불안전의 경계를 나누는 침투거리는 약 2.4m이었다.

- (2) 벤토나이트 농도가 증가할수록 필터계수 λ 도 증가하지만, 필터계수 λ 와 안전율의 상관관계는 대상지반에 따라 다른 결과를 보여주었다. 그러나 침투속도 V 와 필터계수 λ 를 정규화하면, 안전율과 V/λ 는 일정한 관계를 유지하며, V/λ 가 작을수록 안전한 결과를 보였다. 한편, 한계 V/λ 는 약 36cm이었다.
- (3) 최대 침투깊이와 지반의 유효입경(D_{10})은 밀접한 관계를 보인다. 유효입경(D_{10})이 큰 지반일수록, 침투거리가 깊다. 순수한 6% 벤토나이트를 사용할 경우, 한계 D_{10} 은 약 0.75mm이었다. 즉, D_{10} 이 0.75mm 이상인 지반일 경우에는 첨가제를 사용하여, 막장을 안정화해야 할 필요가 있음을 암시해 준다.
- (4) 첨가제는 막장의 안정성에 큰 기여를 하며, 첨가제의 입경이 클수록 대상지반의 입경이 작을수록 효율은 증가함을 보여주었다. D_{10} 이 0.75mm 이상인 지반에서는 물리적인 효과를 기대하는 첨가제만으로 막장안정성을 증가시킬 수 있다. 하지만, D_{10} 이 1.7mm 이상인 지반에서는 물리적인 효과를 기대하는 첨가제만으로는 막장안정성을 유지하기 힘든 것으로 평가되어, 화학반응을 유도하는 첨가제를 추가함으로써 막장안정성을 유지하여야 할 것이다.
- (5) 막장안정성 해석 시 굴진율을 고려하게 되면, 굴진속도에 의해 슬러리의 침투거리가 짧아지고, 침투속도는 굴진율과 같게 된다. 따라서 굴진율을 고려한 막장안정성 해석은 굴진율을 고려하지 않은 경우보다 안전한 결과를 보인다. 즉, V/λ 가 증가할수록 한계굴진율은 증가하며, V/λ 가 70cm일 때, 한계 굴진율은 20mm/min이었다.

이상의 결론은 화학적인 반응을 기대하는 첨가제는 사용하지 않은 경우의 실험결과를 바탕으로 한 것이다. 그러나 지반의 조성이 매우 조립질이고, 물리적인 효과만을 기대하는 첨가제로는 막장안정성을 유지하지 못할 경우에는 화학첨가제를 사용하게 될 것이다. 화학작용을 기대하면 필터계수 λ 가 변하게 되므로 화학반응을 기대하는 첨가제에 따른 막장안정성에 대한 연구도 추

후에 진행되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 실시한 실험은 터널의 막장면을 묘사한 것으로서 스케일 효과에 대한 연구보다는 슬러리의 침투현상과 이 때 간극사이에 퇴적하는 슬러리의 양을 측정하여 결과를 유도하는 데 주목적을 두었다. 실험 스케일이 작음으로 인해서 실제 침투 깊이를 정확하게 측정할 수 없었으나, 이는 폐색이론을 이용해서 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 막장안정성 평가 결과 기준은 논문에서 제시한 터널 단면에 한해서 적용될 수 있다. 다만, 터널 단면의 크기가 다르거나, 해당 터널단면의 슬라이딩 각도가 다를 경우 본 연구에서 제시한 한계유효입경기준은 달라질 수 있으며, 이에 대하여 향후에 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박재만, 森 麟, 김수삼, 森 仁司 (1993), "사질지반에 있어서 니수식철드공법의 니수의 필요성상에관한 연구", *대한토목학회 1993년도 학술발표회 개요집(I)*, pp.441-444.
2. Anagnostou, G. and 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., Hermanns Stengele, R. and Heinz, A. (2002), "Modified Bentonite Slurries for Slurry Shields in High Permeable Soils", *4th International Symposium Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.35-40.
4. Hutchinson, M.t., Daw, G.P., Shotton, P.G. and James, A.N. (1975), "The Properties of Bentonite Slurries Use in Diaphragm Walling and Their Control", *Proceeding of Diaphragm Walls and Anchorages. ICE., London*, pp.33-39.
5. Gruesbeck, C. and Collins, R.E. (1982), "Entrainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media", *Society of Petroleum Engineers Journal*, December 1982, pp.847-856.
6. Henry, L.B., Filz, G.M., and Davidson, R.R. (1998), "Formation and Properties of Bentonite Filter Cakes", *Filtration and Drainage in Geotechnical/Geoenvironmental Engineering, Geotechnical Special Publication*, No.78, ASCE, pp.69-88.
7. Reddi, L.N and 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.
8. Xanthakos, P.P (1979), *Slurry Walls*, McGraw-Hill.

(접수일자 2004. 3. 24, 심사완료일 2004. 8. 21)