사질성 지반에서 이수식 쉴드 TBM 적용시 굴진면으로의 이수 침투특성에 대한 해석적 고찰

노병국¹, 고성일^{2*}, 추석연³

Infiltration behaviour of the slurry into tunnel face during slurry shield tunnelling in sandy soil

Byoung-Kuk Roh, Sung-Yil Koh, Seok-Yeon Choo

ABSTRACT This paper presents numerical analysis of the mud cake infiltration behaviour which is influenced tunnel face stability during excavation by slurry shield TBM. This analysis method can make useful data to select proper shield TBM type and to set up the construction plan . But effective analysis did not proposed until now. In this paper, we carried out numerical analysis using by PFC^{2D} fluid coupling simulation which is suitable for sandy soil modelling. As a analysis result, we checked that the slurry infiltration behaviour varied with soil permeability and slurry characteristic(specific weight, viscosity etc). This analysis method is helpful safety excavation through anticipating the proper slurry viscosity at the design stage and verifying the slurry quality at initial excavation stage.

Keywords: Slurry shield TBM, Mud cake, slurry viscosity, PFC^{2D} fluid coupling simulation

요 약 본 논문은 이수식 쉴드 TBM 굴착시 굴착면 안정에 큰 영향을 미치는 굴착면의 이수 침투에 따른 이막형성여부에 대하여 해석적 고찰을 수행하였다. 이러한 해석적 접근은 이수식 쉴드 TBM의 계획 및 설계시 최적 장비 형식 선정 및 시공계획 수립에 참고가 될 수 있으나, 이제까지 이에 대한 효과적인 해석적 방법에 대하여 제안된 것이 없는 상황이다. 따라서 본 논문에서는 사질토 입자의 모델링에 효과적인 PFC^{2D}의 Fluid Coupling simulation을 이용하여 해석을 수행하였 으며, 해석결과, 이수침투 특성은 굴착 대상지반의 투수성과 이수특성(비중, 점성계수등)에 따라 변화됨을 파악할 수 있었다. 본 해석적 접근방법을 통하여 이수식 쉴드 TBM의 계획 · 설계단계에서 대상지반 특성을 고려한 이수 점도관리 방안 수립과 함께 시공중의 초기굴진단계에서의 최적 이수점도의 재검증을 통하여 안전한 터널시공에 도움이 될 것이라 판단된다.

주요어: 이수식 쉴드 TBM, 이막, 이수침투, 이수 점도, PFC^{2D} fluid coupling simulation

접수일(2012.05.10), 수정일(2012.05.18), 게재확정일(2012.05.22)

¹한국철도시설공단 처장

²(주)단우기술단 기술연구소 이사

³(주)단우기술단 대표이사

*교신저자: 고성일 (E-mail: sungyil@empas.com)

1. 서 론

열악한 지반조건에 적용성이 우수한 쉴드 터널링 공법을 적용함에 있어서 굴진면 안정성 확보 여부는 쉴드 장비별 적정한 막장압 선정에 크게 의존하며, 이토압식(EPB)이나, 이수식(slurry)이나에 따라 이론적인 막장 지보압 산정방법은 다르게 된다.

Horn(1961)이 처음으로 터널굴진면에 3차원적 파괴면을 가정한 터널막장압 산정이론을 제시하였으며, Xanthakos(1979), Anagnostou and Kovari(1994)등에 의하여 이토압식(EPB) 내지 이수식(slurry)의 쉴드 터널의 막장밀폐 형식별 이론적 막장 지보압 산정방법들이 제안되었다.

특히, 챔버(chamber)에 이수를 보내고 이수에 의해 토압, 수압에 저항토록하는 이수식(slurry) 쉴드 터널의 경우, 효과적인 이막(mudcake) 형성여부가 막장 안정성 확보여부에 많은 영향을 미친다. 이에 착안하여 Henry(1998), Müller(1977)는 이수 및 지반과의 경계면에 생성되는 이막의 원리와 특성에 대해 연구하였으며, Anagnostou and Kovari(1994)는 쉴드 터널링 적용 시 지반의 이수 침투 두께, 구성지반 토성의 D_{10} (입경가적곡선의 통과백분율 10%에 해당하는 입경)등에 따른 굴진면 안정성 변화여부를 연구한 바가 있다. 또한, 이인모 등(2004)은 모형실험을 통하여 이수에 의한 굴진면 폐색효과가 굴진면 안정성에 미치는 영향을 연구한 바 있다.

기존의 연구내용에서와 같이 이수식 쉴드 TBM을 적용함에 있어 굴착면 전방에 형성되는 이막이 굴착면 안정성에 많은 영향을 미치고 있으나, 계획·설계단계에서 효과적인 이막형성여부에 대한 평가가 어려움에 따라 본 논문에서는 사질토 입자 모델링에 효과적인 PFC^{2D} fluid coupling simulation을 이용한 해석적 접근을 시도하였다. 이를 위하여 상대밀도 50%수준의 중간정도 조밀도를 가지는 사질토지반을 대상으로 하여 특정 점도의 이수가 굴진면으로 침투되는 깊이를 해석적으로 도출하였으며, 향후 이러한 이막형성 여부 평가방안과 함께 시공 중 초기 굴착단계에서의 최적 이수 점도 재검증을 통하여 안전한 터널시공에 도움이 되고자 하였다.

2. 이수식 쉴드 TBM의 적용지반 범위

2.1 이수식 쉴드 TBM의 개요

높은 지하수 조건과 투수성이 큰 지반조건에서 쉴드 TBM을 이용한 굴착 시 굴진면 안정성 확보는 쉬운 일이 아니다. 이러한 지반조건에서 최초로 쉴드 TBM을 적용한 사례는 1828년 영국의 Thame강 하부굴착이다. 굴진면 안정성 확보를 위하여 Admiral Sir Thomas Cochrane이 제안한 압축공기를 이용하는 방법이 사용되었으며, 압축공기에 의한 방법을 개선하고자 개발된 형식이 1874년 Greathead에 적용되었던 이수식 쉴드 TBM이다.

그림 1. 혼합식 쉴드 TBM의 막장압 제어 시스템(Gulielmetti 등; 2008)

이후 1960년 Schneidereit의 아이디어에 의해 벤토나이트를 이용한 이수가 적용되기 시작되었으며, 1967년 일본에서 현재의 장비 형식인 회전식 Bit를 이용한 직경 3.1 m의 이수식 쉴드 TBM을 적용하였고, 1974년 독일에서도 Wayss & Freytag AG가 이수식 쉴드 TBM을 개발하였다. 따라서 현재의 이수식 쉴드 TBM과 같이 이수를 이용한 굴착장비 형식은 지금으로부터 약 50년 전인 1960년대 이후라 할 수 있다.

한편 이수식 쉴드 TBM과 유사한 시스템을 가지고 있는 혼합식 쉴드 TBM이 유럽에서 1970년대 후반부터 많이 적용되어 오고 있다. 그림 1과 같이 혼합식 쉴드 TBM의 경우 장비 최전방에 챔버가 2개의 칸으로 구분되어 있으며, 앞면의 칸은 순수하게 이수로 충전되어 있고, 뒷면의 칸은 이수 및 에어 쿠션(air cushion)으로 구분되어 압축공기에 의해 이수압을 조절하는 시스템으로 구성되어 있다.

2.2 이수식 쉴드 TBM 적용 지반조건

이수식 쉴드 TBM의 개발배경에서 알 수 있듯이 본 장비 형식은 높은 지하수위 조건과 투수성이 높은 지반조건에서 적용될 목적으로 개발되었기 때문에 현재에도 진보된 장비제작 기술로 적용범위가 조금씩 확대될 뿐 적용 지반조건에 대한 근본적인 차이는 예전과 큰 차이가 없다 할 수 있다.

그림 2. 이수식 쉴드 TBM의 적용 범위(Krause, Th.(1987) and Yoshikawa, T.)

이수식 쉴드 TBM 적용 시 막장안정성 확보를 위한 가장 중요한 사항은 벤토나이트(bentonite) 이수에 의한 굴진면의 불투수층 이막형성 여부이다. 투수성이 매우 높은 굽은 자갈질 조건인 경우 굴진면 전방으로의 이수 누수로 인하여 이막형성이 불가하기 때문에 추가적인 대책이 필요한 반면 (그림 2), 점토 지반과 같이 투수성이 작은 세립지반의 경우에는 굴착토사와 혼합되어 배출되는 굴착토 처리를 위한 과다한 플랜트설비가 필요하게 된다. 따라서, 이수식 쉴드 TBM은 모래질(일부 실트)~자갈질 범위에서 적용성이 높은 장비 형식이며, 지반의 투수계수 및 이수 점성의 효율적인 관리로 이막을 효과적으로 형성하는 것이 시공성 확보에 중요한 요소가 되는 것이다.

3. 이수식 쉴드 TBM의 굴진면 안정기구

3.1 굴진면 이막 형성 기구

이수식 쉴드 TBM은 커터헤드 후면의 챔버내에 이수압을 가압시켜 굴진면 붕괴를 제어하면서 굴착하게 된다. 이수는 송니관(feed line)을 통하여 공급되며, 굴착토사는 이수와 함께 배니관(discharge line)을 통하여 배출되면서 굴착되게 된다.

이수식 쉴드 TBM 공법의 막장안정기구는 가압된 이수압력에 의해 굴진면의 토압 및 수압에 저항하면서 지반변형 및 침하를 억제하게 된다. 터널 굴진 시 굴진면에 침투되는 저투수성 이수는 불투수성 이막을 형성하여 이수압력을 유효하게 작용시킴과 동시에 굴진면의 일정 범위까지 침투하여 지반의 점착력을 증가시킨다.

그림 3. 이수식 쉴드 TBM의 막장압 개념도

Müller는 막장의 이막형성 형태를 토층에 따라 3가지 Type으로 분류하였다.

- ① Type-1 : 이수의 침투가 거의 없고 이막만 형성
- ② Type-2 : 지반의 간극이 커서 이수는 침투할 뿐 이막의 형성이 없다.
- ③ Type-3 : Type-1과 Type-2의 중간으로 이수가 침투해 가면서 이막을 형성

그림 4. 막장의 여과형태(Müller; 1977)

Type-1의 여과형태는 투수계수가 작은 점성토층에서, Type-2는 투수계수가 큰 사력층에서 Type-3은 사질토층에서 주로 발생하는 현상이다. 매우 미소한 두께의 이막이 형성된다면 굴진면 지지압력인 이수압의 효율은 크게 저하하게 되며, 지반에 이수가 과도하게 침투하면 이수압이 막장에 유효하게 작용하지 않을 뿐만 아니라, 지반 간극수압이 상승하여 유효응력의 저하를 초래하기 때문에 막장의 안정에 바람직하지 않다. 따라서, 투수계수가 큰 사질토층, 사력층에서의 이막의 형성 환경을 향상시키기 위한 대처가 필요하다.

3.2 이수압 결정

계획 이수압을 결정하기 위해서는 굴진면에 작용하는 수압 및 토압에 대한 적절한 평가가 요구되며, 수압의 경우 사전 토질조사에 의해 비교적 정확하게 예측할 수 있는 반면에 토압의 경우 확립된 정설이 없다. 따라서, 현장 책임자의 판단에 맡겨지고 있으나, 기존 연구자료 고찰을 토대로 토층별 Slurry 쉼드의 이수압 결정방법을 소개하면 다음과 같다.

가) 점성토층

점성토층은 투수계수가 작고 실트, 점토, 콜로이드 등의 미립상 입자가 전기화학적으로 결합한 상태로 막장으로의 물의 침투가 이루어지지 않아 토압과 수압이 일체가 되어 막장에 가해지는 힘은 삼각형상의 토피의 붕괴를 추정하여 분석하면 된다.

Anagnostou 등(1994)는 P_a (토압)과 P_f (이수압)을 평형이라고 생각하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$P_a = P_f, P_a - P_f = 0 \quad (1)$$

그림 5. 점토지반에서의 활동 메카니즘

$$\frac{1}{2}\gamma H^2 - 2S_u H + qH - \frac{1}{2}\gamma_f H^2 = 0 \quad (2)$$

따라서, 평형방정식으로부터 $H_{cr} = \frac{(4S_u - 2q)}{(\gamma - \gamma_f)}$ 가 유도되고, 안전율은 $F_s = \frac{H_{cr}}{H}$ 가 된다.

여기서, γ : 원지반 단위중량, H : 지반고, S_u : 원지반 비배수전단강도, γ_f : 이수단위중량, q : 상재하중

나) 물이 없는 사질토층

사질토층의 경우 점착력이 없기 때문에 마찰각이 주된 변수이다. 침투벽에 작용하는 원지반 토압과 이수압과의 균형을 생각하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\text{막장작용 토압 : } Pa = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_a,$$

$$\text{이수압 : } Pf = \frac{1}{2}\gamma_f H^2 \left(K_a = \frac{\gamma_f}{\gamma} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \right) \quad (3)$$

여기서, 안전율은 $F_s = 2 \frac{\sqrt{(\gamma \times \gamma_f)}}{\gamma - \gamma_f} \tan \phi$ 가 된다. 모래의 경우는 단위중량, 내부마찰각, 이수의 단위중량에 의해 좌우된다.

3.3 지반으로의 이수 침투를 고려한 안정성 평가

3.3.1 멤브레인 모델(Membrane Model)에 근거한 소요 막장압 평가

이수의 압력은 막장 안쪽으로 밀려들어오는 토압 및 수압을 버텨야 하기 때문에 지반의 간극수압보다 커야 한다. 압력차이 ΔP 는 굴진면에 작용하는 토압에 대응하는 압력이며, 이를 막장지보압이라고 한다(이인모 등, 2004). 막장 지보압은 지반으로 유입되는 이수의 침투정도에 크게 좌우된다. 그림 7과 같이 침투정도가 미약하여 막장의 경계면이 얇은 불투수막에 의해 덮인 것처럼 거동하는 경우를 멤브레인 모델이라 하는데, 멤브레인 모델에 근거하여 막장의 안정성에 필요한 소요 지보압을 구하는 메커니즘을 터널직경 10 m, 터널토피고 10 m 모델에 대한 Parameter Study를 통하여 Anagnostou and Kovari(1994)가 그림 8과 같이 제시하였다.

본 연구결과에 의하면 내부마찰각 40° 정도의 값을 갖는 지반조건에서는 지반점착력이 없고, 가압되는 이수압이 없더라도 터널굴진면은 안정한 상태를 보인다. 반면, 내부마찰각이 30° 이상인 자갈 또는 모래질지반의 경우 지하수위 높이나 지표면으로부터 터널까지의 심도에 관계없이 소요압 $\Delta P=20$ kPa 정도임을 제안하였다.

그림 7. 멤브레인 모델

그림 8. 한계평형상태조건에서의 소요지보압(멤브레인 모델)

그림 9. 이수 침투거리별 굴진면 지보압 변화량

3.3.2 이수 침투거리를 고려한 막장압 평가

이수가 지반으로 유입되게 되면 소요 지보력은 점진적으로 감소하게 되며, Anagnostou and Kovari (1994)는 침투거리에 따른 지보압력 변화량을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{S}{S_o} = 1 - \frac{e}{2 \cdot D \cdot \tan \omega} \quad (e < D \cdot \tan \omega \text{인 경우}) \quad (6)$$

$$\frac{S}{S_o} = \frac{D \cdot \tan \omega}{2e} \quad (e > D \cdot \tan \omega \text{인 경우}) \quad (7)$$

여기서, e 는 이수의 침투깊이이며, S_o 는 멤브레인 모델에서의 지보압력($e=0$ 인 경우), ω 는 Anagnostou and Kovari(1994)가 제안한 3차원 파괴면 슬라이딩 단면에서의 슬라이딩 각도이다. 상기 식에서 소요지보압력 S 는 침투거리 e 가 발생됨에 따라 감소되고 있음을 보여준다.

3.3.3 침투거리, D_{10} , 벤토나이트 함량을 고려한 막장 안정성 평가

Anagnostou and Kovari(1994)는 안전율이 1인 한계상태 조건에서 침투거리와 관련되는 Stagnation Gradient(식 8), D_{10} (입경가적곡선의 통과백분율 10%에 해당하는 토립자 크기), 벤토나이트 함량 등을 고려한 굴진면 안정성 변화양상을 연구하였다(그림 10 및 그림 11).

$$f_{so} = \frac{\Delta p}{e_{\max}} \quad (8)$$

여기서, f_{so} : Stagnation Gradient, Δp : 소요 막장압, $e_{\max}$: 최종 침투거리

그림 10. Stagnation Gradient에 따른 안전율 변화

그림 11. 토립자 크기에 따른 안전율 변화

Stagnation Gradient가 점진적으로 감소한다는 것은 이수침투거리가 증가한다는 것이며, 이 경우 안전율은 점진적으로 감소하게 된다. 굴진면 안전율이 1인 한계상태에서의 $f_{cr}=12 \text{ kN/m}^3$ 의 값을 보이며, 이때의 침투거리는 약 3.0 m에 이른다.

4. 굴착 대상지반의 투수성을 고려한 이막형성 양상 분석

앞서 언급한 바와 같이 이수식 실드 TBM을 적용함에 있어서 막장 전방에서의 이막형성 특성은 이수식 실드 TBM의 성공적인 굴착가능 여부와 직결되는 매우 중요한 요소이다. 그러나, 현재까지 TBM의 계획 및 설계단계에서 이막의 형성여부 또는 형성 특성 파악에 대한 검토는 미수행 되어 왔으며, 시공 중 초기굴착 내지 시험굴착 과정에서 지반 특성에 따른 이수특성(비중, 점성등)을 결정짓는 방법으로 행해져 오고 있다.

따라서, 본 논문에서는 PFC^{2D}의 Fluid Coupling Simulation을 이용한 이막 형성 특성의 검토 방법을 제안하며, 이를 통하여 보다 효과적인 이수식 실드 TBM계획을 수립하는데 도움이 되고자 한다.

4.1 입력 특성치 및 경계조건 선정

지반내에서 유체의 흐름특성은 투수계수에 절대적인 영향을 미친다. 여기서, 투수계수는 대상 지반의 토사 입경, 유체의 비중, 점도 및 간극비 등에 따라 달라지며, Taylor(1948)가 제안한 흙의 투수계수와 관련된 특성치를 나타내는 식 9를 이용하여 입력데이터를 산정하였다.

$$K = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C \quad (9)$$

여기서, D_s^2 : 토립자의 지름(통상적으로 D10의 유효입경을 의미), γ_w : 유체의 단위중량,
 μ : 유체의 점성계수($\text{g/cm} \cdot \text{sec}$), e : 간극비, C : 합성 형상계수

여기서, 이수(벤토나이트)의 단위중량 및 점성계수는 기존의 이수식 쉴드 TBM 및 슬러리 월 (Slurry Wall)에서 시공관리 기준으로 제시하고 있는 단위중량(γ_w) $1.04 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$, 점성(μ) $220 \sim 300 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ 에서 각각 1.2 g/cm^3 및 $220 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ 를 대표치로 선정하였다.

본 해석을 위한 모델링은 이수압의 막장전방으로만의 침투특성을 파악하기 위하여 H 10 m×B 20 m의 단일 Cell로 모델링하였고, 이수의 자유로운 흐름을 유도하기 위하여 토립자 생성 시 만든 단일 Cell 외곽 벽체를 모두 제거하였다. X축 좌·우측의 수두차는 Anagnostou and Kovari(1994)가 제안한 굴진면 소요압을 고려하여 20 kPa에서 0 kPa로 가하였으며, Y축 상·하부는 nonslip조건으로 모델링하였다.

사질토 거동을 모사하기 위한 최대 및 최소 입자직경은 각각 $D/100 \sim D/50$ (D 터널직경)으로 산정하였으며(그림 12-a), 모래질 및 실트질 지반의 변형계수는 상대밀도 50% 정도의 값으로 가정하고, 입자간의 수직 및 전단강성은 동일($K_n=K_s$)하다는 가정하에 PFC^{2D}를 이용한 일축압축강도의 수치해석을 수행하여 K_n , K_s 를 $10^8 \text{ N/m}^2/\text{m}$ 로 산정하였다.

아울러 그림 12-b과 같이 Fluid Coupling Simulation을 위한 지하수 포화 영역을 터널 막장 전면에 부가하였으며, 3 D와 달리 2 D에서는 이수가 흐를 수 있는 입자사이 통로가 존재하지 않기 때문에 이를 모사하기 위하여 흙의 간극과 간극을 연결하는 Flow path를 이용한 해석을 수행하였다.

이수식 쉴드 TBM이 굴착되는 과정에서 세그먼트 1링을 조립하기 위한 사이클 타임을 고려하여 분석단계를 선정하였으며, 총 분석 단계는 100,000 Step 및 각 Step 별 0.1초 간격(=167 분)으로 산정하여 해석을 수행하였다(표 2).

표 1. 해석 조건별 입력 물성치

구 분	유효입경(D_{10}) (cm)	이수 단위중량(γ_w) (g/cm^3)	이수 점성계수(μ) ($\text{g/cm} \cdot \text{sec}$),	간극비	산정된 투수계수 (cm/sec)
모래질 지반(Case 1)	3.6	1.20	220	0.67	1.91
실트질 지반(Case 2)	0.096	1.20	220	0.54	7.71×10^{-4}

* 형상 계수 C는 100~150범위중에 150을 선택함.

그림 12. 수치해석 모델링도

표 2. 폭 1.5 m 세그먼트 조건에서의 TBM 굴착 및 세그먼트 조립 사이클 타임

구 분	굴착	세그먼트 조립	총 시간	해석시간
시 간	준비 + 굴착 $10\text{분/링} + (1,500\text{ mm/링} \div 30\text{ mm/min})$ $= 60\text{분/링}$	$7\text{조각/링} + 10 \sim 15\text{분/조각}$ $= 105\text{분/링}$	165분/링	167분

4.2 해석결과 분석

본 연구에서는 투수계수에 따른 이수의 침투양상을 파악하기 위하여 이수가 침투할 때 발생하는 간극수압(Pore-Pressure)을 이용하여 이막의 형성두께 및 슬러리 침투거리를 확인하는 방법으로 평가하였다.

그림 13. 모래지반에서의 간극수압 분포형상

그림 14. 실트지반의 간극수압 분포형상

그림 15. 막장으로 부터의 시간 및 이격거리별 간극수압 변화(모래지반)

그림 16. 막장으로 부터의 시간 및 이격거리별 간극수압 변화(실트지반)

그림 13 및 14와 같이 간극수압 분포 집중도는 모래지반 및 실트지반 모두에서 굴진면으로 부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보인다. 또한, 이막 형성두께는 간극수압이 집중되는 부분으로 간주할 수 있는데 투수계수가 큰 모래지반에서 약 3 m, 투수계수가 작은 실트지반에서 약 1 m 내외로 확인되었다. 이는 투수계수가 작아짐에 따라 이수 입자의 Clogging에 의한 이막 형성이 유리한 조건이 된다고 할 수 있다.

투수계수에 따른 굴진면으로 부터의 이수 침투거리를 평가하기 위하여 시간에 따른 굴진면 이격거리별 간극수압분포를 그림 15 및 16과 같이 도시하였다. 여기서, 이수 침투시간은 현장 상황을 반영하기 위하여 표 2와 같이 TBM 및 세그먼트 조립 사이클 타임을 고려하여 167분까지 수행하였으며, 수치해석 수행 결과 굴진면으로부터 간극수압은 투수계수가 큰 모래지반에서 약 10 m 까지 분포하는 반면, 상대적으로 투수계수가 작은 실트지반에서 약 3 m로 나타나, 본 구간까지 이수가 침투하였음을 알 수 있다. 이러한 현상을 Müller가 제안한 그림 4의 지층 Type별 이막형성 조건과 비교해 본다면 Type-3과 유사한 형상으로 사질토 및 실트질 지반조건에서는 이막 후방의 일정구간까지 이수가 침투하고, 벤토나이트 입자의 Clogging 및 폐색 효과가 가중되면서 막장전면에서 이막이 형성된다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 국내외에 많이 적용되고 있는 이수식 실드 TBM의 주요 요소인 이수에 의한 불투수성 이막 형성 특성을 사질토 입자 모델링에 효과적인 PFC^{2D} Fluid coupling simulation을 이용하여 해석적으로 분석한 내용이다. 본 검토내용은 이제까지 이수식 실드 TBM의 계획 및 설계단계에서 검토한 경험이 없는 접근방안으로 주요 결론은 다음과 같다.

1. 적용 지반 범위가 모래(일부 실트)~자갈에 해당되는 이수식 쉴드 TBM의 경우, 쉴드 TBM의 막장안정성 확보를 위한 막장압력은 이수에 의해 가압되며, 이때 굴진면에서의 불투수층의 Membrane 형성은 안정성 확보에 매우 중요한 요소이다.
2. 기존 연구사례 분석을 통하여 이수식 쉴드 TBM에서 적용되는 굴진면 지보압은 지반으로 유입되는 이수의 침투정도에 따라 크게 변화되며 침투거리가 길수록, 이막형성 조건이 양호할수록 소요 막장 지보압은 적어짐을 파악할 수 있었다. 즉, 굴진면으로의 이수침투거리는 이수 점도(벤토나이트 함량) 및 D10이하 토립자 함유율에 따라 달라지게되므로 이수식 쉴드 TBM 굴착 시 적정 이수 품질관리와 함께 적정 막장압 산정이 굴진면 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.
3. 흙의 상대밀도 50%수준인 중간정도의 느슨한 사질토 및 실트질 지반에 대하여 이수 비중 1.2 g/cm^3 , 점성 $220 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ 을 적용하였고, Anagnostou and Kovari(1994)가 제안한 굴진면 소요압 $\Delta P=20 \text{ kPa}$ 을 적용한 PFC^{2D} Fluid Coupling Simulation 결과, 이막이 형성되는 구간이라 생각할 수 있는 간극수압 집중구간은 실트질 지반에서는 약 1.0 m, 투수성이 실트질 보다 상대적으로 높은 모래질 지반에서는 약 3.0 m 두께정도임을 해석적으로 확인할 수 있었으며, 이는 대상지반의 투수성과 이수 특성(비중, 점성계수등)에 의존하여 변화될 것으로 판단된다.
4. 본 논문은 설계단계에서 이제까지 검토되지 않았던 굴진면으로의 이수 침투특성을 파악하고자 하는 해석적 고찰내용으로서, 이를 통하여 이수식 쉴드 TBM 설계 시 이수 품질관리에 대한 기초 검토가 가능할 것으로 판단되며, 특히 특수 지반조건의 대구경 이수식 쉴드 TBM이 계획된다면 모형실험 및 수치해석적 검토의 상호보완과 함께 이를 기초로 한 시공 중 초기굴진단계에서의 이수특성 재검증을 통하여 터널 시공안정성 및 환경성 확보에 유리할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이인모 et al, (2004), “슬러리 쉴드 터널이 막장 안정성 평가”, 한국지반공학회 논문집 제20권 6호, 한국지반공학회, pp. 95-107.
2. Anagnostou, G., Kovari, K. (1996), “Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields”, Tunnelling and Underground Technology, Vol. 11, No. 2, pp. 165-173.
3. Anagnostou, G., Kovari, K. (1994), “The face stability of slurry-shield-driven tunnels”, tunnelling and underground technology, Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.
4. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2008), “Mechanized tunnelling in urban areas(design methodology and construction control)” Taylor and Francis.

5. Henry, L.B., Filz, G.M., Davidson, R.R. (1998), "Formation and properties in porous media", Society of Petroleum Engineers Journal, December 1982, pp. 847-856.
6. Horn, N. (1961), "Horizontal earth pressure on the vertical surfaces of the tunnel tubes", National Conference of the Hungarian Civil Engineering Industry, Budapest, November, pp. 7-16.
7. Itasca Consulting Group Inc. (1999), "PFC^{2D} particle flow code in 2 dimensions", Minneapolis, Itasca.
8. Müller-Kirchenbauer, H. (1972), "Stability of slurry trenches", Proc. 5th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Madrid, Vol. 1, pp. 543-553.
9. Shimizu, Y., Hart, R.D., & Cundall, P.A. (2004), Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods.
10. Taylor, D. W. (1948), "Fundamentals of soil mechanics", Wiley, New York, pp. 134-135
11. Xanthakos, P.P. (1979), Slurry Walls, McGraw-Hill.