

파쇄대를 통과하는 해저터널의 수리거동에 관한 연구

Hydraulic behavior of a subsea tunnel in a ground with fractured-zones

신종호¹⁾, Jong-Ho Shin, 최규철²⁾, Kyu-Cheol Choi

¹⁾ 건국대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

²⁾ 건국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

SYNOPSIS : Subsea tunnels that link land to island and among nations for transportation, efficient development of limited surface and pursuit of economic development should be designed to support pore water pressure on the lining. It is generally constructed in the bed rock of the sea bottom. When the tunnel excavation face meets fractured-zones below sea bottom, collapse may occur due to an increase of pore water pressure and large inflow. Such an example can be found in the Norwegian subsea tunnel experiences in 1980's. In this study hydraulic behavior of tunnel heading is investigated using numerical method based on the collapse of Norwegian subsea tunnel. The effect of pore water pressure and inflow rate were mainly concerned. Horse-shoe shaped model tunnel which has 50 m depth from the sea bottom is considered. To evaluate hydraulic performance, parametric study was carried out for varying relative permeability. It is revealed that pore water pressure has increased with an increase of sea depth. Especially, at the fractured-zone, pore water pressure on the lining has increased significantly. Inflow rate into tunnel has also increased correspondingly with an increase in sea depth. S-shaped characteristic relation between relative permeability and normalized pore water pressure was obtained.

Key Words : subsea tunnel, fractured-zone, hydraulic behavior, numerical analysis

1. 서론

효율적인 국토개발을 위하여 육지와 섬을 연결하는 연육화, 국가간 연결을 통해 경제적 발전을 도모하고, 부족한 육상공간의 대체를 위하여 노르웨이, 일본, 영국 등의 건설 선진국에서는 일찍이 해저공간을 활용한 해저시설물의 건설이 활발하게 진행되고 있으나 국내에는 해저시설물의 건설사례가 부족하고 관련연구가 미흡하여 이에 대한 개발의 필요성이 대두되고 있다(신종호 등, 2008).

해저시설물은 지상 또는 지중에 건설된 시설물과는 달리 고수압 조건에 노출되어 있어 수압 및 구조물 내 해수의 유입량의 제어가 반드시 고려되어야 한다. 해수의 영향을 받는 해저터널의 설계에 있어 터널 내 유입수의 처리 또는 배제와 라이닝에 작용하는 수압을 지지할 수 있도록 구조적 안정성의 확보가 가장 중요한 수리요소가 된다. 일반적으로 터널은 배수형 터널과 비배수형 터널로 구분되는데, 터널 내 물의 유입을 최대한으로 허용하고, 라이닝에 수압이 작용하지 않는 터널을 배수형 터널이라 하며, 터널 내 유입을 배제하고, 정수압에 해당하는 하중을 지지할 수 있도록 설계하는 것을 비배수형 터널이라 한다. 터널건설에 있어 배수형 터널과 비배수형 터널의 이점에 관한 논쟁은 지속적으로 진행되어 왔는데, Ward and Pender(1981)는 비배수 조건으로 터널을 설계하더라도 시간경과에 따라 누수가 발생하게 되어 대부분의 터널이 배수구(conduit)와 같이 거동한다고 하였다. 한편, Lee et al.(2002), Shin et al.(2002)

는 배수 조건으로 설계된 터널의 경우에도 배수재 압착 및 폐색, 토립자 유동 등에 의하여 장기적으로 수리기능의 저하가 발생하고, 이로 인해 터널 내 유입이 원활히 이루어지지 않는다고 보고한바 있다. 이러한 관점에서 배수·비배수형 터널은 장기적 운영측면에서 보았을 때 각각의 초기 설계개념이 유지되지 않음을 알 수 있다.

수위 하부로의 터널건설은 인접지반의 수리환경을 변화시키고, 터널 내로의 침투를 발생시킨다. 완전 배수 조건의 터널에서는 원활한 배수를 기본가정으로 하였을 때 라이닝에 수압이 발생하지 않는다. 그러나 부분배수 조건의 경우에는 라이닝에 수압이 작용하게 되고, 라이닝의 투수성이 주변지반에 비하여 현저히 낮아지게 되면 터널은 비배수형 터널의 거동을 보인다.

이처럼 해저터널은 건설 및 운영에 있어 수압과 유입량의 제어가 관건이라 할 수 있다. 한편, 해저터널은 대부분 지보성능이 토사지반에 비해 뛰어난 암반층에서 건설되는데, 굴착이 진행되는 과정에서 단층이나 절리, 파쇄대와 같은 연약대와 인접하거나 통과하게 되는 경우가 발생한다. 이러한 연약대는 지반조사 후의 시공과정에서 되도록 우회하여 건설하게 되나 터널의 선형성 확보 및 공사비 등의 문제로 인하여 부득이하게 연약대를 통과하게 되는 경우가 종종 발생한다. 파쇄대는 작은 단층이 생성되면서 암석이 잘게 파쇄된 곳을 일컫는데, 이러한 파쇄대는 침식 및 붕괴가 신속하게 진행되며, 일반적으로 강도 또한 약하다. 작게는 수 cm에서 크게는 수백 m에 이르는 다양한 규모의 파쇄대는 암반 내에서 물의 통로를 구성하게 되어 해저터널 건설 시 파쇄대를 통과하게 되면, 지하수 용출 또는 터널 붕락 등의 사고가 발생할 수 있어 매우 신중한 시공이 요구된다. 실제로 기건설된 해저터널 중 굴착과정에서 단층과 파쇄대를 통과하게 되면서 터널막장의 천단부 붕락사고가 1980년대에 노르웨이에서 발생하였으며(Dahlø and Nilsen, 1992), 국내에서도 해저터널은 아니지만 파쇄대로 인하여 터널막장 천단부가 붕락된 사고사례가 있었다.

따라서 본 논문은 노르웨이의 사례를 토대로 이를 3차원으로 모델링하여 침투해석(seepage analysis)을 수행함으로써 파쇄대를 통과하는 해저터널의 수리거동을 파악하고자 하였으며, 이를 통해 파쇄대가 터널에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

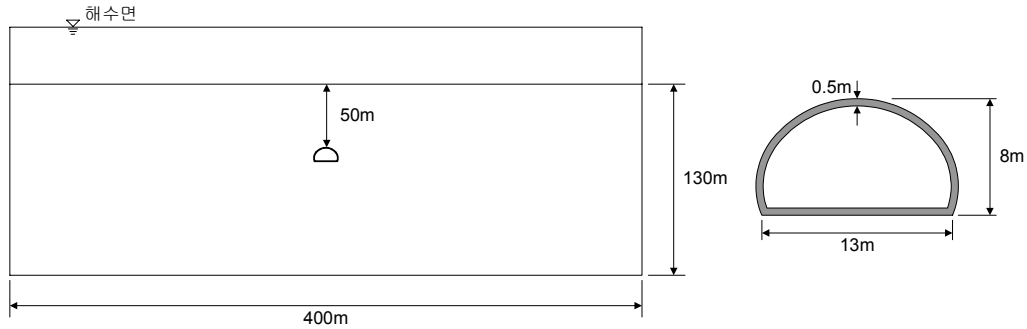
2. 해석모델 및 해석케이스

2.1 개요

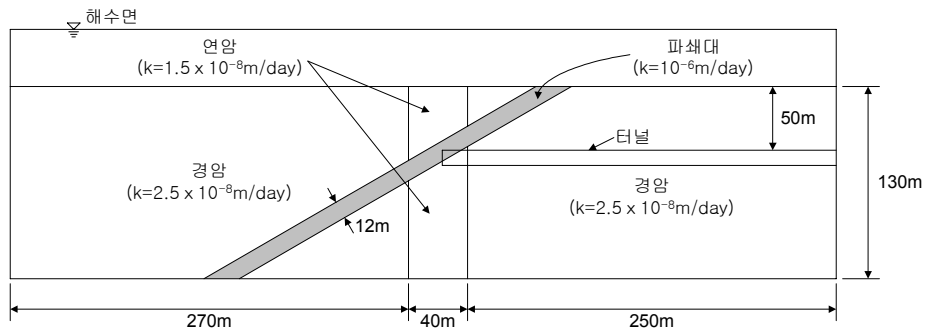
본 해석에 적용한 모델은 해저 암반구간 중 파쇄대를 통과하는 해저터널의 3차원 모델로서 해수면의 특성상 수위의 변동이 없이 항상 일정하게 유지되는 정상류 조건(steady state flow)으로 설정하였으며, 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS를 사용하여 Darcy의 흐름법칙이 적용된 침투류 해석(seepage analysis)을 수행하였다. 해석모델은 파쇄대로 인한 천단붕괴사고가 발생한 노르웨이의 Vardø 해저터널을 기초로 하여 모델링하였으며, 본 해석을 통해 파쇄대의 영향을 직접적으로 받는 구간과 영향이 없는 구간에 대한 라이닝 작용 간극수압과 유입량을 검토하여 파쇄대 분포가 터널 라이닝에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2.2 해석모델

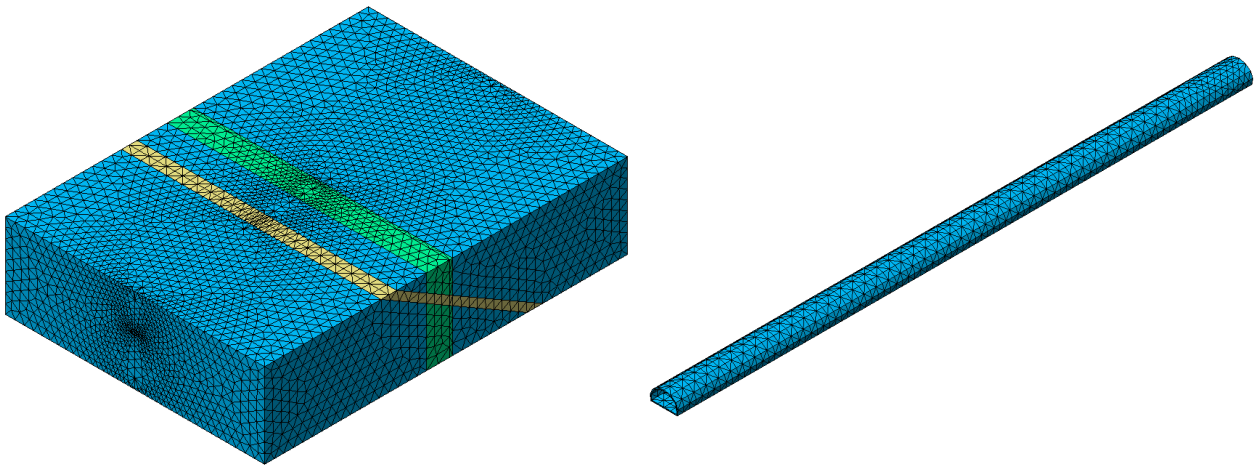
본 해석은 정상류 흐름을 가정한 침투해석으로서 해석에 적용된 지반모델은 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 횡방향 폭은 400 m, 종방향 폭은 560 m로 설정하였으며, 파쇄대의 각도는 노르웨이 해저터널 사례(Dahlø and Nilsen, 1992)를 바탕으로 30°로 적용하였다. 또한, 터널모델은 폭 약 13 m, 높이 8 m인 마제형 터널이며, 라이닝의 두께는 0.5 m로 설정하였다. 그림 1은 해석적용 모델의 종·횡방향 개념도와 라이닝 및 지반모델을 나타낸 것이다.



(a) 횡방향 모델 개념도



(b) 종방향 모델 개념도



(c) 지반 및 라이닝 모델
그림 1. 해석모델

2.3 해석케이스

파쇄대를 통과하는 해저터널의 수리거동분석을 위하여 해수의 수위에 변화를 주어 해석에 적용하였으며, 그림 2와 같이 수위가 20~100 m로 변화하는 5개 조건에 대한 침투해석을 수행하였다. 해저터널 조건의 특성상 항상 일정하게 수위가 유지되는 정상류 흐름조건을 가정하여 터널 굴착 시 수위저하는 발생하지 않는 것으로 설정하였으며, 터널의 심도는 천단부를 기준으로 50 m로 고정하였다. 또한, 수리경계조건에 의한 영향을 검토하기 위하여 라이닝/지반 투수계수비(k_l/k_g)를 1, 0.1, 0.01, 0.001로 변화를 주어 해석을 수행하였다. 이는 실제 터널에서 발생할 수 있는 배수시스템의 수리기능 저하, 이로 인한 라이닝 작용수압의 변화를 모사하기 위함이다.

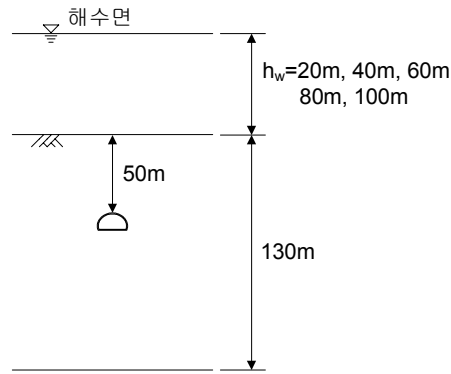


그림 2. 수위변화 해석케이스

3. 해석결과 분석

3.1 간극수압분포

과쇄대를 통과하는 해저터널 주변지반의 해수흐름특성의 파악을 위하여 간극수압의 분포를 확인하였다. 과쇄대 통과부인 터널 막장면 주변지반의 간극수압분포를 확인하기 위하여 모델의 반단면을 분할하여 등고선(contour) 형태로 나타내었다. 그림 3은 해수의 수위가 20 m일 때의 간극수압분포로서 라이닝/지반의 투수계수비가 1인 경우는 해수의 유입 및 배수성능이 원활함을 나타내고, 투수계수비가 0.01인 경우는 부분배수 조건으로 배수성능이 저하되어 간극수압이 상대적으로 크게 분포함을 나타낸다. 해수의 수위가 100 m일 때의 주변지반 간극수압분포는 그림 4와 같다.

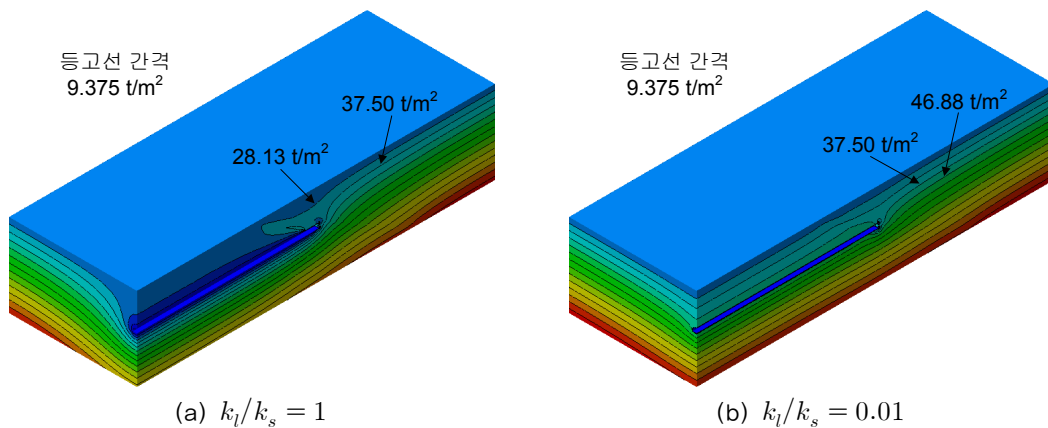


그림 3. 지반모델 간극수압 분포($h_w=20$ m)

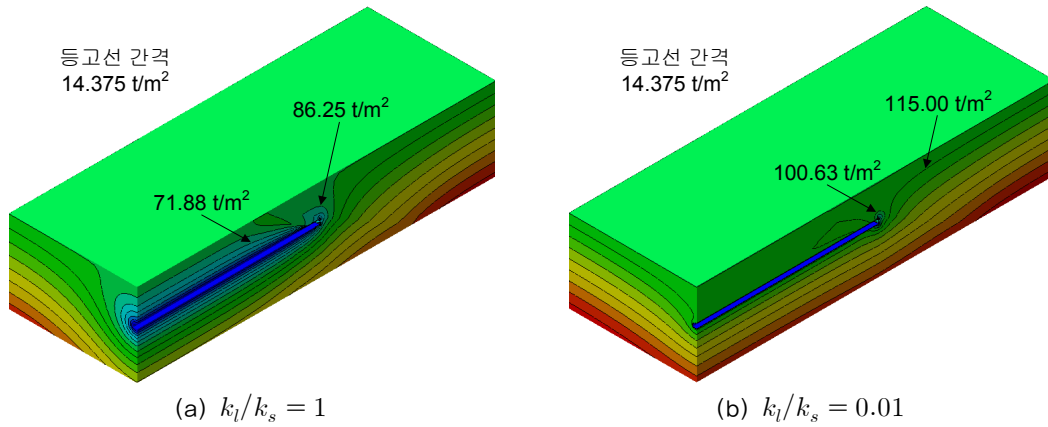


그림 4. 지반모델 간극수압 분포($h_w=100$ m)

해석결과 수위가 높아지고 라이닝/지반 투수계수비가 저하함에 따라 터널 주변지반의 간극수압은 큰 폭으로 증가함을 알 수 있으며, 특히 파쇄대로 인하여 물길이가 형성된 구간은 파쇄대의 영향을 받지 않는 구간과 비교하였을 때 상대적으로 높은 수압분포를 나타냄을 알 수 있다. 수위증가 및 투수계수비의 저하에 따라 터널의 막장면 인접지반의 간극수압은 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 배수성능의 상태를 떠나 인접지반에 비해 투수계수가 상당히 커서 물길이의 역할을 하는 파쇄대 방향으로 흐름이 집중되어 나타난 결과로 볼 수 있다. 그림 5~6은 수위가 20 m와 100 m일 때의 막장부 주변지반의 종단면 간극수압분포를 나타낸 것이다. 이를 통해 파쇄대의 영향을 직접적으로 받는 막장부와 영향이 거의 없는 구간의 지반 간극수압차를 확인할 수 있다.

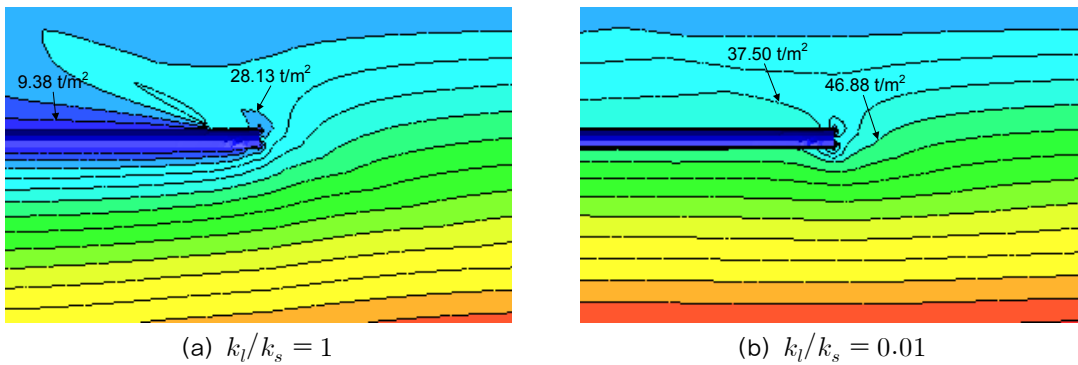


그림 5. 막장부 주변지반 간극수압분포($h_w=20$ m)

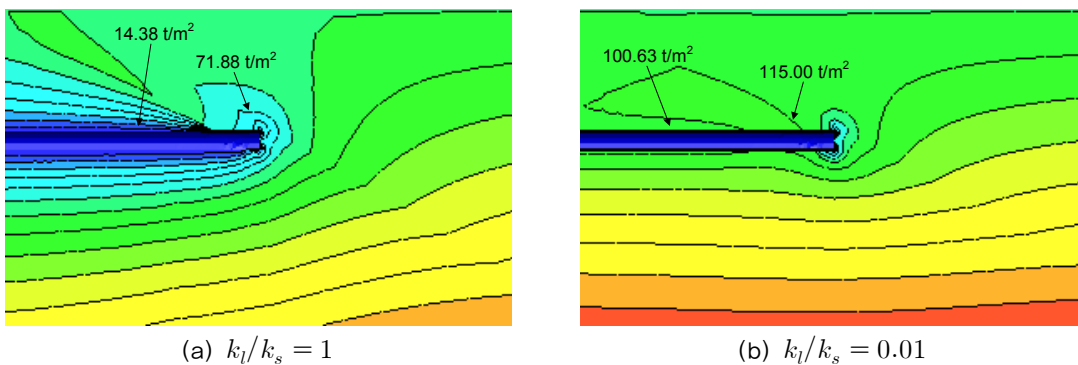


그림 6. 막장부 주변지반 간극수압분포($h_w=100$ m)

본 해석결과를 터널연장/터널높이의 비(L/h)에 따라 라이닝에 작용하는 정규화 간극수압분포를 그래프로 나타내면 그림 7과 같다. 본 논문에서 다른 해석조건의 경우 막장부 주변에서는 매우 높은 분포를 보이다가 거리가 멀어짐에 따라 급격히 저하하면서 L/h 가 10 이상이 되면 점차 수렴하는 양상을 보이면서 파쇄대의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 라이닝/지반 투수계수비, $k_l/k_s = 1$ 의 조건으로서 정수압에 대하여 정규화한 간극수압의 분포를 투수계수비의 변화에 따라 각각 나타내면 그림 8~10과 같다.

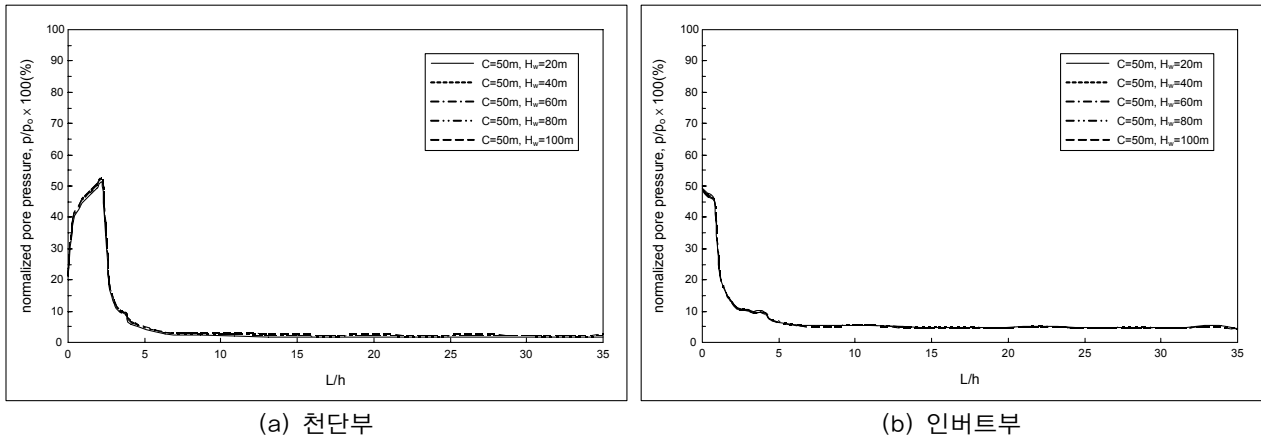


그림 7. L/h 비에 따른 정규화 간극수압분포($k_l/k_s = 1$)

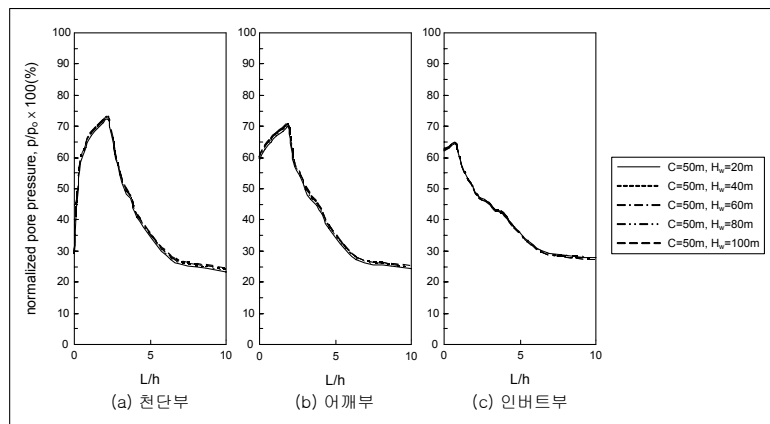


그림 8. L/h 비에 따른 정규화 간극수압분포($k_l/k_s = 0.1$)

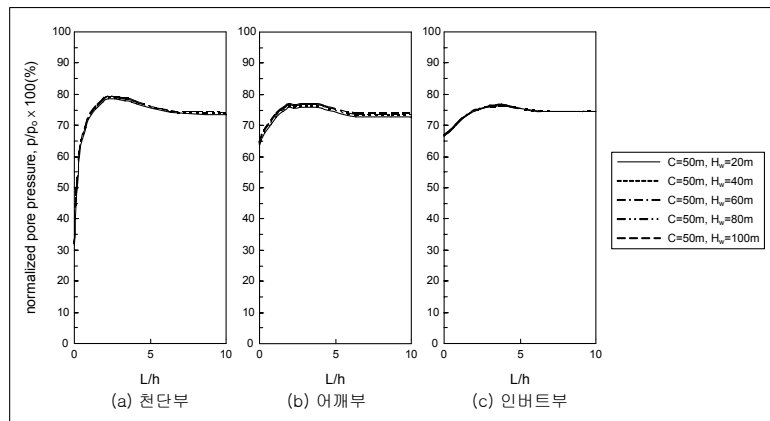


그림 9. L/h 비에 따른 정규화 간극수압분포($k_l/k_s = 0.01$)

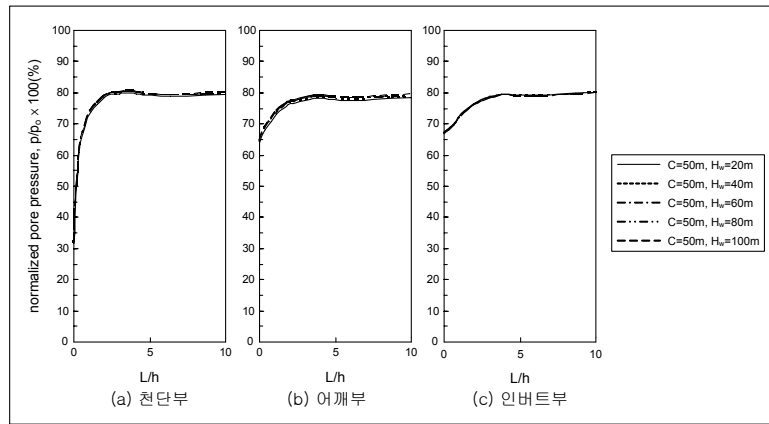


그림 10. L/h 비에 따른 정규화 간극수압분포($k_l/k_s = 0.001$)

투수계수비 저하에 따른 정규화 간극수압은 $k_l/k_s = 1, 0.1$ 에서는 수압이 증가하는 양상을 보이다가 거리가 멀어짐에 따라 점차 감소하여 L/h 가 10 이상이 되면 일정수준으로 수렴하는 분포를 보인다. 하지만 $k_l/k_s = 0.01$ 이 되면 파쇄대로부터의 거리가 멀어지게 되더라도 감소양상을 보이지는 않으며, $k_l/k_s = 0.001$ 에서의 수압분포와 거의 유사하게 나타나 투수계수비가 0.01 이하가 되면 터널은 비배수 거동에 근접하게 됨을 알 수 있다. 이때에는 터널 라이닝 전체가 비배수 거동을 보여 파쇄대와와의 근접 여부와는 무관하게 됨을 알 수 있다.

또한, 파쇄대로부터의 이격거리, 즉 파쇄대 영향여부에 따른 라이닝에 작용하는 정규화 간극수압분포를 투수계수비에 대하여 나타내면 그림 11 및 그림 12와 같다.

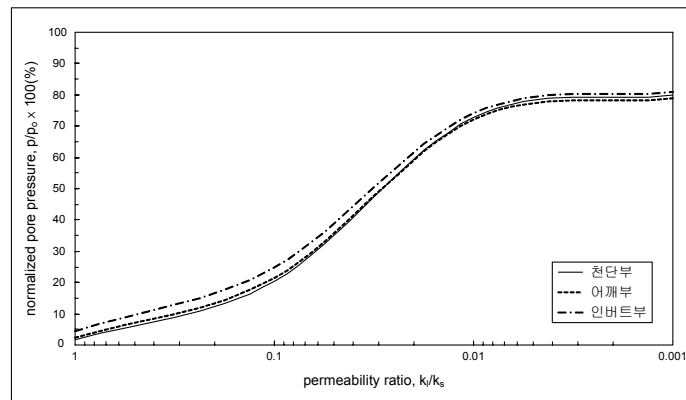


그림 11. 파쇄대 영향을 받지 않는 구간의 정규화 간극수압분포(막장으로부터 250 m 이격)

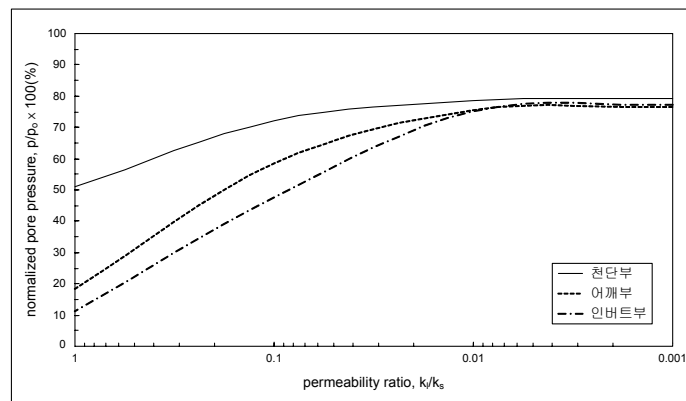


그림 12. 파쇄대 통과구간의 정규화 간극수압 분포(막장으로부터 18 m 이격)

그림 7~10을 보면, 배수능력이 원활한 경우($k_l/k_s = 1$)에는 파쇄대를 통과하는 구간의 라이닝에 작용하는 수압이 정수압의 약 50% 정도이나 터널의 배수능력이 저하하면서 정수압의 최대 약 80%에 근접하는 양상을 보임을 알 수 있다. 또한, 파쇄대를 통과하는 구간의 수압이 배수가 원활한 경우에도 상당한 수준으로 수압하중으로 라이닝에 작용하게 되어 구조적 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

그림 11의 경우와 같은 막장으로부터의 이격거리가 250 m로 파쇄대의 영향을 받지 않는 구간은 정규화 간극수압분포가 펼쳐진 S자 곡선으로 나타남을 알 수 있다. 하지만 그림 12와 같이 파쇄대를 통과하는 구간의 경우에는 파쇄대 영향이 없는 구간과 투수계수비가 0.01 이하에서는 유사한 거동을 보이거나 배수가 원활히 이루어지는 경우의 수압분포가 상당히 크게 나타났다. 특히, 천단부의 간극수압분포가 어깨부나 인버트부에 비해 크게 분포하고 있는 것으로 보아 노르웨이나 국내의 사고사례와 같은 막장면의 천단부 붕락현상의 가능성이 있다고 판단된다.

3.2 유속벡터

그림 13은 해수의 수위가 20 m일 때의 전체 라이닝에 작용하는 유속벡터를 나타낸 것이다. (a)는 배수능력이 원활한 때의 유속벡터로서 파쇄대를 통과하는 구간에서만 유속벡터가 집중함을 확인할 수 있고, 배수능력이 저하된 (b)의 경우 유속분포는 파쇄대 통과구간 및 영향을 받지 않는 구간 모두 유사한 분포를 보였다. 이러한 유속벡터의 양상은 상기에서 언급한 간극수압의 분포와 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

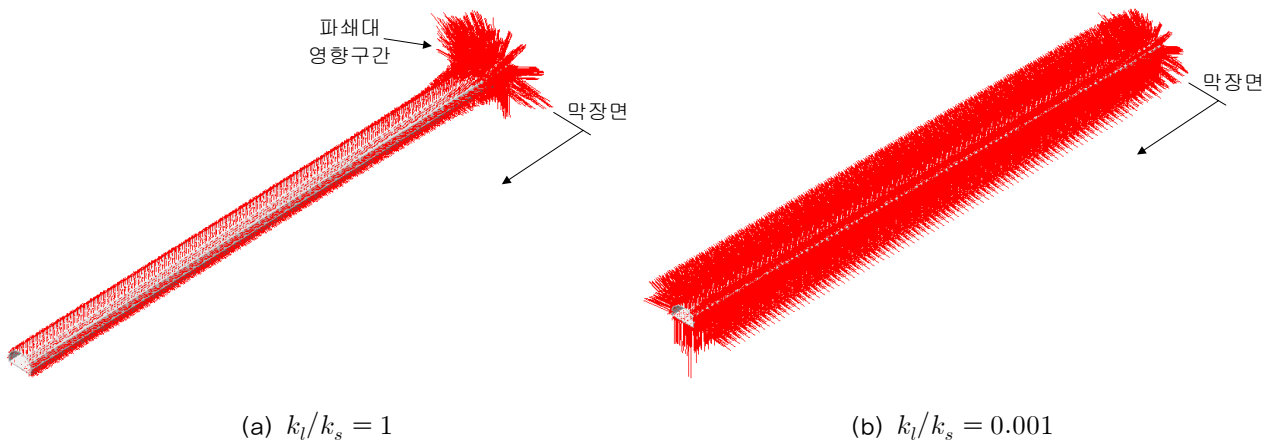


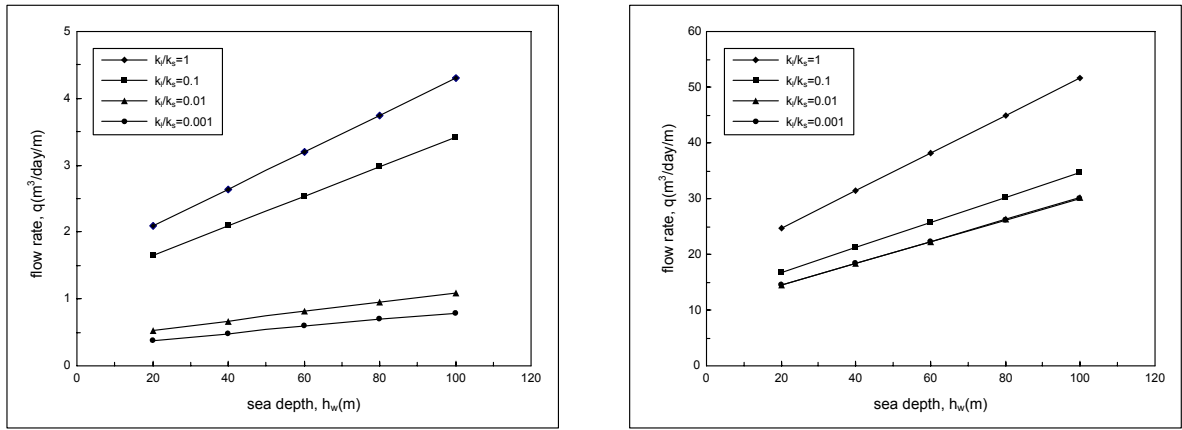
그림 13. 유속벡터($h_w=20$ m)

3.3 유입량

터널 내 유입량은 라이닝에 작용하는 수압과 반비례 관계에 있다. 유입량은 터널경계면에서의 수리경계조건에 따라 현저히 차이를 보이게 된다. 그림 14 (a)는 파쇄대의 영향이 적은 구간에서의 투수계수비별 유입량을 나타낸 것이며, 그림 14 (b)는 파쇄대의 직접적인 영향을 받는 구간에서의 투수계수비별 유입량을 보인 것이다.

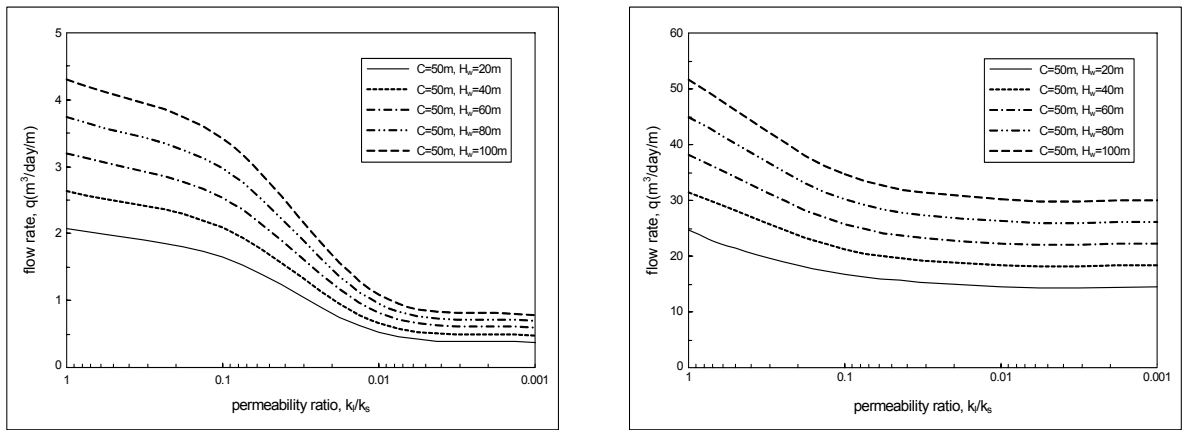
터널 내 유입량은 수두가 20~100 m로 변화함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 동일한 수두에 대하여 파쇄대의 영향을 직접적으로 받는 막장부 구간이 현저하게 큰 터널 내 유입양상을 보였다. 이는 파쇄대로 해수가 유입되면서 이 구간을 통과하는 터널 내로 유입량이 집중된 결과라 볼 수 있다. 이 결과에 따르면 완전배수 조건을 가정하였을 경우 터널 내 유입량은 해수의 수위에 비례한다. 하지만 해저 터널은 전수두(수위+토포)가 매우 큰 고심도·고수압 조건이므로 완전배수형 터널로 설계하는 것은 바람직하지 않으며, 역학적으로 허용 가능한 범위에서 유입량을 제어하여 수리구조적 배분을 최적화하는

것이 중요하다(신종호 등, 2008).



(a) 파쇄대 영향이 적은 구간($L=36\sim 250$ m) (b) 파쇄대 영향을 받는 구간($L=0\sim 36$ m)

그림 14. 파쇄대 영향에 따른 투수계수비별 유입량



(a) 파쇄대 영향이 적은 구간($L=36\sim 250$ m) (b) 파쇄대 영향을 받는 구간($L=0\sim 36$ m)

그림 15. 파쇄대 영향에 따른 수위조건별 유입량

라이닝의 투수조건에 따른 터널 내 유입특성의 파악을 위하여 부분배수 조건에 대한 영향을 분석하여 그림 15와 같이 수심에 따른 유입량으로 나타내었다. 그림 16의 (a), (b) 모두 수위가 증가함에 따라 유입량이 증가하는 양상을 보이며, (b)의 경우 투수계수비가 저하하더라도 유입량은 (a)와 같이 큰 폭으로 감소하지 않아 파쇄대가 터널 내 해수의 유입을 지배함을 알 수 있으며, 이에 대한 적절한 방·배수 대책이 마련되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석적 방법을 사용하여 고수압 조건에 있는 해저터널의 파쇄대 영향에 대한 수리거동특성을 고찰하였다. 다양한 심도와 수리경계조건을 고려한 본 연구를 통해 확인된 파쇄대를 통과하는 해저터널의 수리거동특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수위상승 및 배수성능 저하에 따라 라이닝에 작용하는 간극수압은 크게 증가한다.
- 2) 파쇄대 통과구간은 영향이 미치지 않는 구간과 비교하였을 때 매우 높은 수압분포를 보인다.
- 3) 본 논문에서 고려한 해석조건에 대하여 간극수압분포는 파쇄대를 통과하는 막장부 부근에서 가장 높은 수압분포를 보이다가 거리비가 증가하면서 급격히 수압이 감소하여 $L/h \geq 10$ 이면 일정하게

수렴한다.

- 4) 파쇄대 통과여부와 관계없이 라이닝/지반 투수계수비(k_l/k_s)가 저하함에 따라 간극수압분포 및 유속 벡터는 비배수형 터널과 유사한 거동특성을 보인다.
- 5) 터널 내 유입량은 수두(h_w)의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.
- 6) 파쇄대 통과구간은 영향이 미치지 않는 구간에 비해 최대 10배 가량의 유입량이 발생하게 되며, 파쇄대 통과 시 과도한 해수의 유입 또는 고수압 작용에 의하여 터널의 구조적 안정성에 심각한 피해가 발생할 수 있다.
- 7) 해저터널의 경우 전수두(수위+토포)가 매우 크므로 완전배수형 터널로의 설계가 난해하며, 투수계수 제어를 통한 수리구조적 배분의 최적화가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부의 첨단도시개발사업인 “해저시설물 차폐기술 개발(과제번호 : C105A 1080001-05A0508-00330)” 연구의 일환으로 수행되었으며, 국토해양부의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신종호, 박동인, 주은정(2008), “라이닝-지반 수리상호작용이 해저터널에 미치는 영향”, 한국터널공학회 학술논문집, Vol.10, No.1, pp.49~57
2. Ward, W. H., Pender, M. J.(1981), “Tunnelling in soft ground-general report”, Proc. the 10th Intl. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.4, pp.261~275
3. Tore S. Dahlø and Bjørn Nilsen(1992), “Stability and rock cover of Norwegian hard rock sub-sea tunnels”, Norwegian Subsea Tunnelling, No.8, pp.27~34
4. Lee, I. M., Kim J. H., Reddi, L. N.(2002), “Clogging phenomena of the residual soil-geotextile filter system”, Geotechnical Testing Journal, Vol.25, No.4.
5. Shin, J. H., Addenbrooke, T. I., Potts, D. M.(2002), “A numerical study of the effect groundwater movement on long-term tunnel behavior”, Geotechnique, Vol. 52, No.6, pp.391~403.