

# 오염물질 확산방지를 위한 토목섬유 연직차수벽 연결부의 투수성능 평가

## Permeability Characteristics of Geosynthetics Vertical Barrier Connections for the Prevention of Contaminants Diffusion

박정준\*

Jeong Jun Park\*

Research Professor, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Jeong Jun Park, smearjun@hanmail.net

### ABSTRACT

**Purpose:** In this study, we used hydrophilic waterstop used in geosynthetics vertical barrier system to evaluate the performance of impermeability under sealing conditions. **Method:** ASTM D5887 and ASTM D6766 were applied to determine the capability of the connection during the geosynthetics vertical barrier system. Hydrophilic waterstop was saturated in each solution and the weight, thickness, and volume changes were analyzed over elapsed time. Hydrophilic waterstop was installed at the geosynthetics vertical barrier system connection to evaluate the permeability characteristics. **Results:** As the expansion reaction time of hydrophilic waterstop increased relatively under saline conditions, the decrease in permeability also showed a smaller decrease in fresh water. Furthermore, the method of engagement of the geosynthetics vertical barrier system showed somewhat better performance of the impermeability due to the large pressure resistance caused by the roll joint type than interlock type. **Conclusion:** In urban pollutants, which can estimate the outflow of pollutants such as oil storage facilities and industrial complexes, proactive response technologies that can prevent the contaminant diffusion can significantly reduce the damage.

**Keywords:** Geosynthetics Vertical Barrier System, Permeability Performance, Hydrophilic Waterstop, Contaminant Diffusion, Connection Type

### 요약

**연구목적:** 본 연구에서는 토목섬유 연직차수시스템에 사용되는 팽창 지수재를 사용하여 지수재의 팽창에 따른 차수성능을 평가하였다. **연구방법:** 토목섬유 연직차수 공법 적용시 연결부에 대한 투수능을 판단하기 위하여 ASTM D5887과 ASTM D6766을 준용하였다. 팽창 지수재를 각 용액에 포화시킨 후 시간경과에 따른 무게, 두께, 부피 변화를 분석하였으며, 토목섬유 연직차수벽 연결부에 팽창지수재를 설치하여 투수 특성을 평가하였다. **연구결과:** 염수조건에서 지수재의 팽창반응 시간이 상대적으로 늘어남에 따라 투수능의 저하도 담수에서 보다 작은 감소폭을 나타내었다. 또한 토목섬유 연직차수재료의 결속 방법에 따라 롤 이음방식이 인터록 방식 보다 수두차에 의한 압력저항이 커서 차수성능이 다소 우수하게 나타났다. **결론:** 주유소, 유류저장시설 및 산업단지 등 오염물의 유출을 추정할 수 있는 도심지 오염원에서는 오염물질 확산을 방지할 수 있는 사전대응 기술이 피해규모를 현격하게 감소시킬 수 있다.

**핵심용어:** 토목섬유 연직차수벽, 투수성능, 팽창지수재, 오염 물질 확산, 연결방식

Received | 30 August, 2021

Revised | 7 September, 2021

Accepted | 10 September, 2021

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

## 서론

도시지에서 지반의 오염은 수질 및 대기 오염만큼 심각하게 고려되어지고 있지 않지만, 경제 성장과 함께 화학 물질 사용이 증가하면서 급격히 증가하고 있다(Ministry of Environment, 2009; Awad et al., 2014; Tang et al., 2015). 최근, 우리나라에서는 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 지반 오염의 심각성이 고조되고 있고, 다양한 사회 인프라 개발 사업에 의해 영향을 받게 되는 지반환경에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히, 유류사용량이 크게 증가하면서, 주유소의 유류저장탱크, 화학물질 저장시설로부터 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 지반환경 오염 문제가 지속되고 있다. 특히 주유소, 군부대 유류저장시설 및 산업단지 저장시설로부터 발생하는 총탄화계수소는 지속적인 오염원으로 작용할 가능성이 매우 높기 때문에, 피해규모와 처리비용이 매우 크게 발생한다(Park et al., 2018). 특히, Ławniczak et al.(2020)은 전 세계적으로 가장 큰 환경 오염 물질은 원유 기반의 탄화수소로부터 발생된다고 보고한 바 있다.

오염된 토양을 복원하기 위해 다양한 정화기술을 활용하고 있으며, 정화기술은 오염된 지반의 굴착 유무에 따라 지상처리 공법과 지중처리공법으로 구분된다(Teefy, 1997; Ministry of Environment, 2007). 이와 같은 정화기술은 이미 오염된 지반을 정화하여 자연으로 환원하는 것을 의미한다. 그러나 지반이 오염된 후에 오염에 대한 인지가 확인되기까지 많은 시간이 소요되기 때문에, 오염물의 확산에 따른 피해가 크게 발생한다. 따라서 오염물질의 유출 가능성이 큰 주유소, 유류저장시설 및 산업단지 등에서는 오염 후 정화기술의 적용보다는 오염물 확산을 방지할 수 있는 사전대응 기술이 피해규모를 현격하게 감소시킬 수 있다.

오염물의 확산은 액체상태에서 농도변화에 의해 발생하게 된다. 즉, 지하수에 수용된 오염물 및 액상 오염물의 농도를 감소시킬 수 있는 반응매체를 적용하여 오염물의 확산을 감소시킬 수 있다. 특히, 오염된 지하수의 정화는, 효과적이고 친환경적인 반응물질을 사용하여, 현장에 적절한 시공법을 사용한 투수성반응벽체(Permeable Reactive Barriers, PRBs)를 이용하면 현장에서 저렴한 비용으로 처리 가능하다 (Blowes et al., 1997; U.S. EPA, 2001). 또한 PRBs는 일반적으로 오염대가 존재하는 지중에 설치하며 지하수 오염대의 수리학적 흐름을 이용한다(Blowes et al., 1997; Boni et al., 2009).

다양한 오염물의 확산을 방지하기 위하여 벤토나이트 층이 지오텍스타일 또는 지오텍스브레인으로 감싸진 토목섬유점토차수재는 널리 보급되어 있다. 토목섬유점토차수재는 낮은 투수계수, 높은 역학적 안정성을 보유하고 있기 때문에, 매립지, 댐, 인공 호수, 저장 탱크, 매립지, 오염된 지반과 같은 많은 지반 공학 분야에 응용되고 있다(Shackelford et al., 2016; Wu et al., 2015). Xue et al.(2012)는 농도가 다른 여러 종류의 용액을 사용하여 수침된 토목섬유점토차수재에 대한 투수시험을 수행하였고, 팽창과 투수계수의 관계를 분석하였다.

Kim et al.(2001)은 양입도의 모래와 점토질 모래로 분류되는 흙을 대상으로 오염된 지하수의 정화를 위하여 고화재를 활용한 혼합 차수벽을 형성하는 경우, 비산재와 석회가 함유된 고화재의 투입량과 최적 함수비를 평가하였다. 그리고 고화재가 함유된 혼합 차수재료의 성능 향상에 대한 연구를 수행하였다. Yun et al.(2019)는 칼슘 벤토나이트-모래 혼합차수재에 대해 다짐시험을 실시하여 최적함수비를 산정하였다. 그리고 칼슘 벤토나이트 혼합비에 따른 변수위투수시험을 실시하여 혼합 차수재료의 투수 특성을 평가하였다.

현재 국내에서는 여러 가지 지수재료 중에서 토목섬유 연직차수공 이음부의 차수성능을 확보하기 위하여 물과의 반응에 의하여 팽창을 일으켜 지수재 흙에 의해 구속되는 반발력으로 수압에 저항하며 차수효과를 나타내는 수팽창 지수재를 사용하고 있다. 연직차수공의 장기적 누수 원인으로는 담수 및 염수에 포함되어 있는 화학물질에 의한 지수재의 내구성 저하를

들 수 있다(Lee et al., 2009).

본 연구에서는 토목섬유 연직차수시스템에 사용되는 팽창 지수재를 사용하여 지수재의 팽창에 따른 차수성능을 평가하였다. 장기적인 내구성능을 볼 때, 염수에는 일반적으로 염화물과 나트륨이 포함되어 있으며, 일반적인 지하수 등의 담수에는 황산염이 포함되어 있으므로 제작된 투수성능 실험장치를 이용하여 담수 및 염수 조건에서 지수재의 투수성 저하에 대한 연구를 수행하였다.

## 실험방법

다양한 재료의 투수성능을 평가하기 위한 시험방법은 많이 존재하지만, 오염물과 차수재료의 반응에 따른 투수성능 시험방법은 한정적이다. 그래서 이 연구에서는 팽창 지수재의 투수 및 차수 성능 평가를 위한 시험방법으로 ASTM D5887과 ASTM D6766을 준용하였다. 이 실험장치는 물 뿐만 아니라 화학적 용액을 대상으로 실험이 가능하며, 모식도는 Fig. 1과 같다.

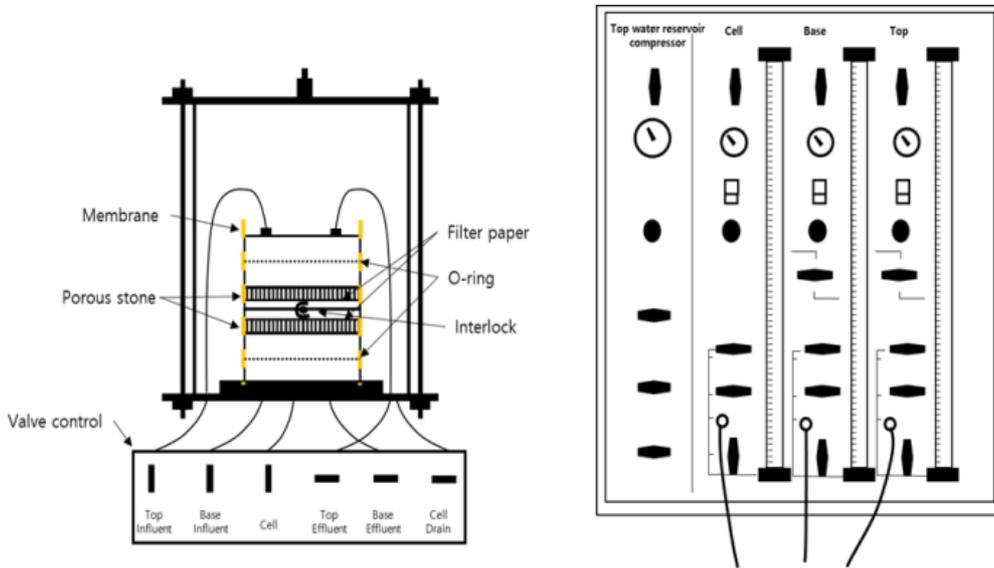


Fig. 1. Schematic diagram of permeability test equipment

실험 장치는 크게 압력장치와 셀로 구분된다. 압력장치는 실험체가 설치되는 셀의 압력을 조정하는 장치이며, 셀은 실험체가 압력을 받을 수 있는 구조로 이루어져 있다. 투수실험 장치를 이용하여 크게 정수위, 변수위, 일정유량 측정법 등의 실험을 수행할 수 있는데, 본 연구에서는 변수위 측정법을 적용하여 실험을 수행하였고, 실험방법을 요약하면 다음과 같다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 토목섬유 연직차수 공법 적용시 연결부에 대한 투수능을 판단하기 위하여 각각의 실험체를 준비하였다. 실험체는 돌출된 접합 부분에서 실험 중 비틀림 방지 및 가장자리 부분으로의 침투영향을 배제하기 위하여 아크릴틀에 거치되었다. 가장자리 부분은 실리콘 처리하여 누수를 방지하였으며, 지수재 적용에 따라 침투용액과의 반응에 따른 팽창압을 고려하기 위하여 상·하부 고정틀을 제작하여 팽창에 따른 투수능 변화를 평가할 수 있도록 하였다. 지수재의 팽창성을 분석하기 위해 고무계열 지수재에 대하여 팽창성 실험을 실시하였다. 즉, 토목섬유 연직차수벽체의 차수성능은 연결부의

투수능에 의존하기 때문에, 연결부에 고무계열 지수재로 적용하여 투수성능 실험을 진행하였다. 사용된 고무계열 지수재는 경도 35~50 Hs, 인장강도 2.45 MPa 이상, 연신율 500 % 이상의 물리적 성질을 가지고 있다.

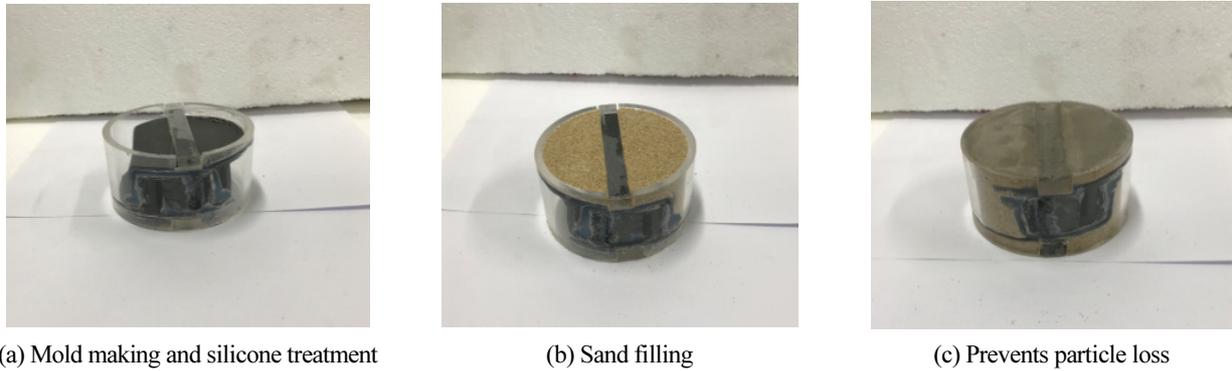


Fig. 2. Connection preparation process of geosynthetics vertical barrier

또한, 침투용액에 따른 투수능을 평가하기 위하여 담수와 염수를 이용하여 투수시험을 실시하였다. 실험에 사용된 염수는 염도가 100ml 기준 3.1%~3.8% 정도이고, 사용된 담수는 지하수를 이용하였다. 두 침투용액에 대하여 포화시간에 따른 투수능을 평가하였다.

Fig. 3과 같이 투수능 실험은 초기에 셀의 압력과 배압을 70kPa로 올리고, 1분 간격으로 70kPa 씩 증가시켜 550kPa 의 셀 압력이 작용되도록 하였으며, 배압이 515kPa를 충족할 수 있게 준비하고 일정시간 포화를 진행하였다. 그리고 실험체의 하부에 15kPa를 증가시켜 유입압력 530kPa에서 실험을 수행하였으며, 실험체 상부와 하부의 압력차는  $15 \pm 0.5$  kPa 유지하였다.

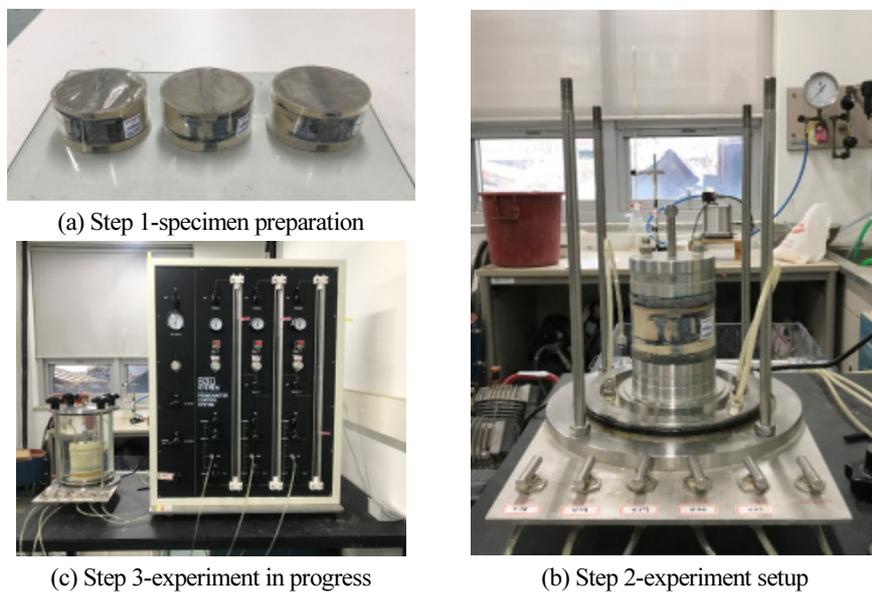


Fig. 3. Test procedure

## 투수능 실험 결과

### 용액 종류에 따른 지수재 반응 특성 평가 결과

토목섬유 연직차수벽의 연결부에 대한 차수성능을 평가하기 위하여 용액 종류에 따른 반응시간별 지수재의 투수능 변화 특성을 평가하였으며, 실험에 사용된 S1~S4 시험체는 염수, S5~S8 시험체는 담수 용액에 포화시킨 것이다.

지수재를 각 용액에 포화시킨 후 시간경과에 따른 무게, 두께, 부피 변화를 분석하였다. Fig. 4와 같이 담수와 염수의 포화 시간에 따른 무게 변화를 평가한 결과, 염수조건의 경우에는 48시간 이내에 초기 무게 대비 약 1.8%의 증가율을 나타냈으며, 7일 후 약 4.9%의 증가율을 보여 염수에 대한 지수재의 반응은 미미한 것으로 평가되었다. 담수조건의 경우, 48시간 이내에 초기 무게 대비 약 24.3%의 증가율을 나타냈으며, 7일 후에는 약 52.5%의 증가율을 보였다.

Fig. 5와 같이 지수재의 두께 변화를 관찰한 결과, 염수조건에서는 48시간 및 7일이 경과하였을 때, 각각 7.4%, 11.6%가 증가한 것을 알 수 있었다. 반면에, 담수조건에서는 48시간 및 7일이 경과하였을 때, 각각 23.5%, 37.7%의 증가율을 보였다.

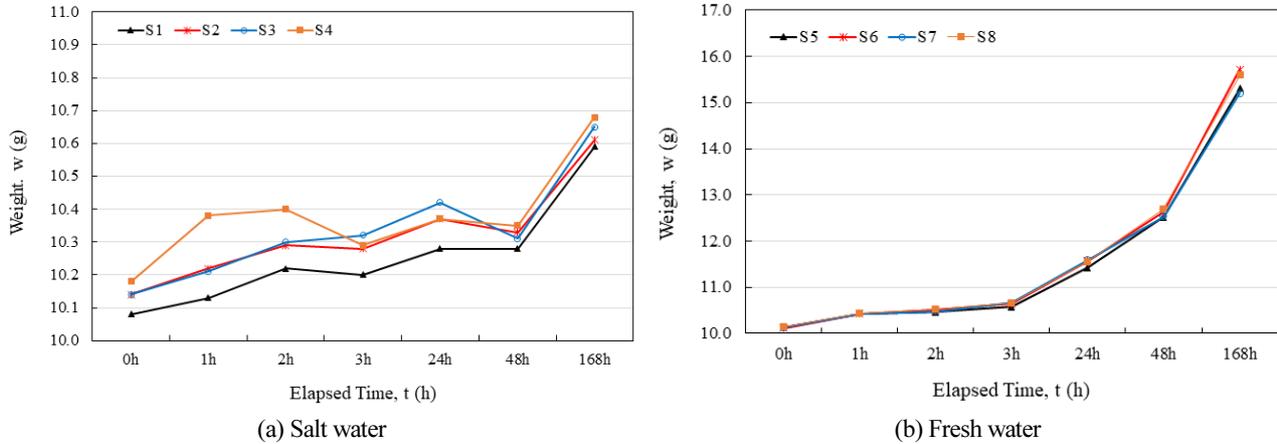


Fig. 4. Weight change of hydrophilic waterstop according to the solution type

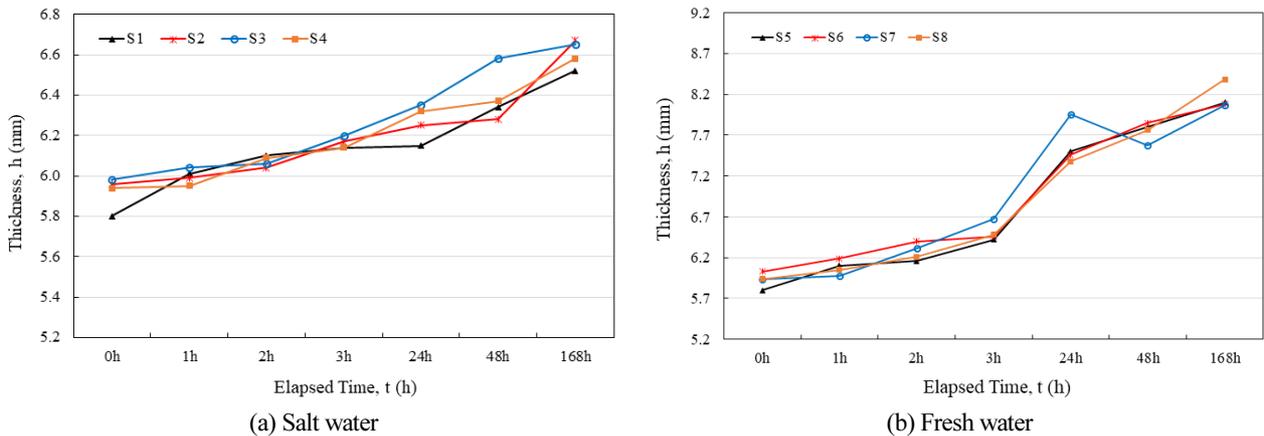


Fig. 5. Thickness change of hydrophilic waterstop according to the solution type

Fig. 6과 같이 용액 종류에 대한 지수재의 팽창성을 평가하기 위하여 부피 변화를 확인하였다. 그 결과, 염수 조건에서는 포화시간 48시간 내에 약 10%가 증가하였으며, 7일 후에는 약 11.8%가 증가하였다. 반면에, 담수 조건에서는 48시간 내에 초기 부피 대비 약 30%가 증가하였고, 7일 후에는 37%까지 증가함을 알 수 있었다. 즉, 용액 종류에 따른 부피 변화의 차이는 무게 및 두께 변화 차이와 마찬가지로 담수에서 더 많은 팽창성을 나타내었다. 지수재는 고흡수성 폴리머로 구성되어 있어 폴리머가 물과 접촉하면 폴리머 외부의 물 농도가 내부의 농도보다 높아 나트륨 중화에 의해 형성된 삼투압에 의해 팽창이 지속되나, 염수의 경우에는 삼투현상이 적게 발생하여 두께, 부피변화가 담수조건보다 상대적으로 작게 발생하는 것이다.

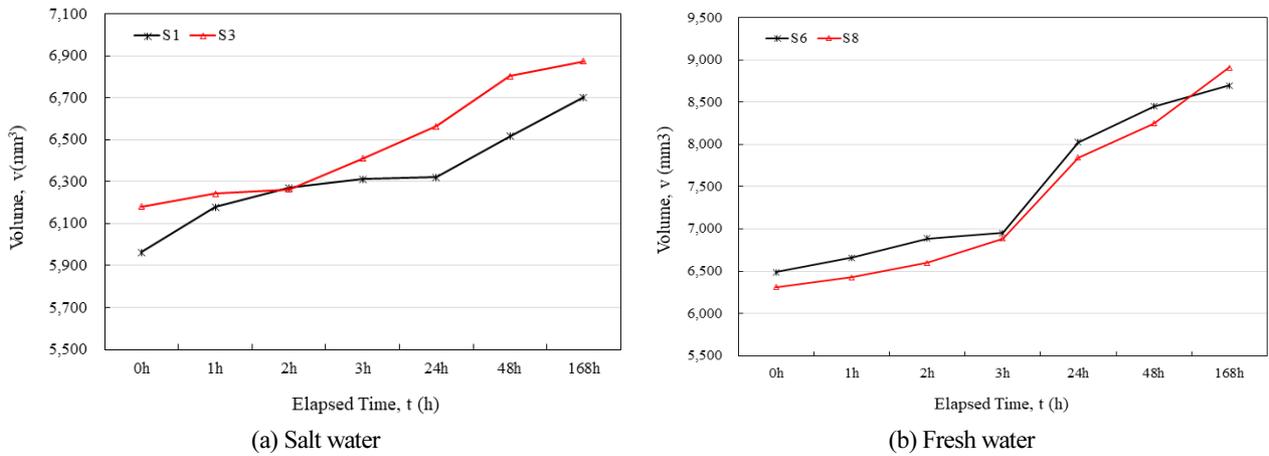


Fig. 6. Results of volume change of hydrophilic waterstop according to the solution type

### 이음부에 지수재를 적용한 토목섬유 연직차수벽의 투수능 특성 평가

투수능 실험장치를 이용하여 지수재를 적용한 각각의 토목섬유 연직차수재료의 투수능 실험을 진행하였고, 각 실험체를 담수와 염수에 포화시킨 후 시간경과에 따른 투수능을 평가하였다. Table 1은 실험조건을 나타낸 것이며, Geosynthetics I 은 롤 타입 방식, Geosynthetics II는 인터록 방식의 차수공법 연결부 조건이다.

Table 1. Experiment condition

| Item                                       | Solution    | Measurement time            |
|--|-------------|-----------------------------|
| Case 1 - Geosynthetics I (roll joint type) | salt water  | 0h, 6h, 12h, 24h, 48h, 7day |
| Case 2 - Geosynthetics II (interlock type) |             |                             |
| Case 3 - Geosynthetics I (roll joint type) | fresh water |                             |
| Case 4 - Geosynthetics II (interlock type) |             |                             |

Fig. 7(a)는 Case 1에 대한 투수능 시험결과로서, 염수조건에서는 초기에는  $10^{-4}$  cm/s, 48시간 경과 시에는  $10^{-7}$  cm/s, 7일 후에는  $10^{-8}$  cm/s의 투수계수를 나타내었다. 지수재의 염수조건에 대한 투수능을 고려하였을 때, 염수 조건에서 지수재의 팽창반응 시간이 상대적으로 늘어남에 따라 투수능의 저하도 담수에서 보다 작은 감소폭을 나타내었다.

Fig. 7(b)는 Case 2에 대한 투수능 실험결과로서, 염수조건에서는 초기에는  $10^{-4}$  cm/s, 48시간 경과 시에는  $10^{-6}$  cm/s, 7일 후에는  $10^{-7}$  cm/s의 투수계수를 나타내었다. 시간경과에 따른 투수계수 감소경향은 Case 1의 경우와 유사하였지만, Case 1의 투수계수가 더 낮게 나타났기 때문에, Case 2에 비하여 차수성능에 있어 유리한 것으로 판단된다.

Fig. 7(c)는 Case 3에 대한 투수능 실험결과로서, 염수조건에서는 초기에는  $10^{-4}$  cm/s의 투수계수를 나타내었으나, 48시간 경과시에는  $10^{-9}$  cm/s, 7일이 경과된 시점에서는  $10^{-12}$  cm/s의 투수계수를 나타내어 불투수 조건을 만족하여 차수효과를 확인하였다. Fig. 7(d)의 Case 4를 보면 염수조건에서의 초기 투수계수는  $10^{-4}$  cm/s이었으나, 48시간 경과시에는  $10^{-9}$  cm/s, 7일 경과시점에서는  $10^{-12}$  cm/s의 투수계수를 나타내어 차수효과를 확인하였으며, 시간경과에 따라 Case 3와 유사한 투수계수 감소 경향을 보였다.

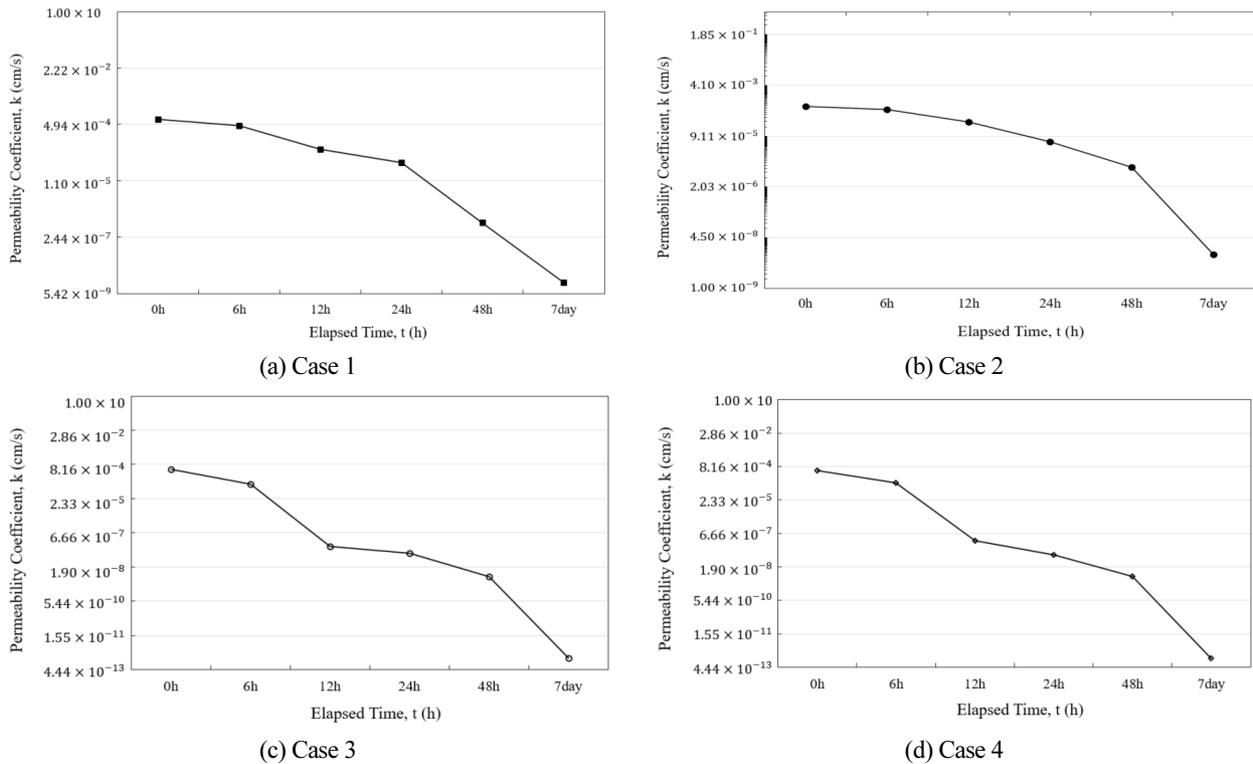


Fig. 7. Permeability coefficient according to elapsed time

Fig. 8은 염수와 담수조건에 따른 실험결과를 나타낸 것이다. 담수에서 포화시킨 토목섬유 차수벽 실험체의 경우 48시간 이 경과하였을 때에는  $10^{-9}$  cm/s 이하의 투수계수를 나타내었으며, 7일 경과 시에는  $10^{-12}$  cm/s로 확인되었다. 그리고 염수로 포화시킨 토목섬유 차수벽 실험체의 경우에는 48시간 경과 시에  $10^{-6}$  cm/s~ $10^{-7}$  cm/s의 투수계수가 확인되었고, 7일 경과시에는  $10^{-7}$  cm/s ~  $10^{-8}$  cm/s의 투수계수가 나타났다. 이를 바탕으로 토목섬유 연직차수재료의 결속 방법에 따라 Geosynthetics II에 비하여 Geosynthetics I 연직차수벽이 수두차에 의한 압력 저항이 커서 다소 우수한 차수성능을 나타내었다.

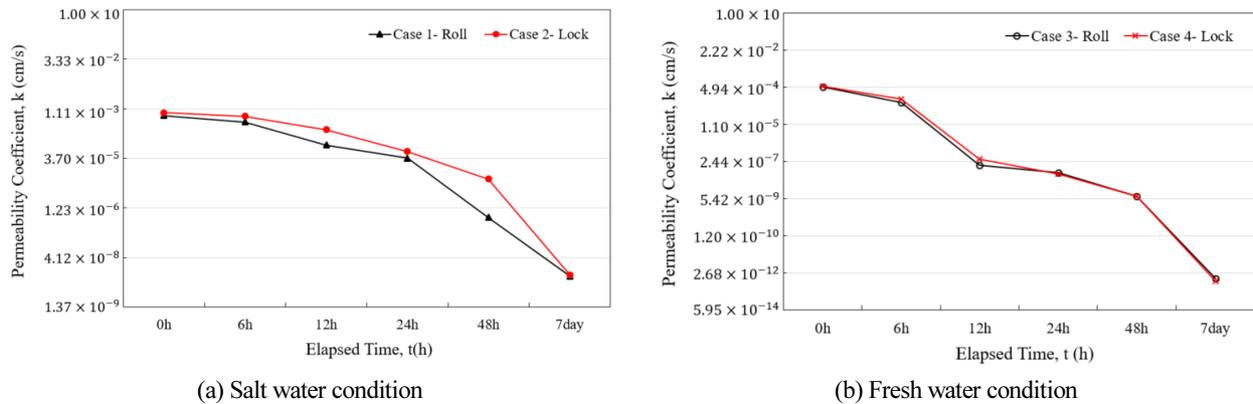


Fig. 8. Permeability coefficient according to water condition and connection method

## 결론

토목섬유 연직차수 공법 적용 시 연결부에 대한 투수능을 판단하기 위하여 ASTM D5887과 ASTM D6766을 준용하였다. 팽창 지수재를 각 용액에 포화시킨 후 시간경과에 따른 무게, 두께, 부피 변화를 분석하였으며, 토목섬유 연직차수벽 연결부에 팽창 지수재를 설치하여 투수 특성을 평가하였다.

염수조건에서는 지수재의 팽창반응 시간이 담수조건에 비해 상대적으로 길어짐에 따라 차수성능이 다소 떨어지는 결과를 나타내었으며, 토목섬유 연직차수재료의 결속 방법에 따라 롤 이음방식이 인터록 방식 보다 수두차에 의한 압력저항이 커서 차수성능이 다소 우수하게 나타났으므로 흙의 종류, 지하수위, 차수재 설치 깊이 등 지반조건에 따라 토목섬유 연직차수 공법의 연결방식을 고려해야 한다.

즉, 주유소, 유류저장시설 및 산업단지 등 오염물의 유출을 추정할 수 있는 도심지 오염원에서는 오염 후 정화기술의 적용 보다는 오염물질 확산을 방지할 수 있는 사전대응 기술이 피해규모를 현격하게 감소시킬 수 있다. 따라서 오염지역의 복원기술개발 뿐만 아니라 오염물의 확산방지를 위한 기술에 대한 연구가 필요하다.

## References

- [1] Awad, Y.M., Kim, S.C., Abd El-Azeem, S.A.M., Kim, K.H., Kim, K.R., Kim, K.J., Jeon, C., Lee, S.S. (2014). "Veterinary antibiotics contamination in water, sediment, and soil near a swine manure composting facility." *Environmental Earth Science*, Vol. 71, pp.1433-1440.
- [2] Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L. (1997). "In-Situ remediation of chromate contaminated groundwater using permeable reactive walls." *Environmental Science & Technology*, Vol. 31, pp. 3348-3357.
- [3] Boni, M.R., Sbaffoni, S. (2009). "The potential of compost-based biobarriers for Cr(VI) removal from contaminated groundwater: Column test." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, pp. 1087-1095.
- [4] Kim Y.H., Lim, D.H., Lee, J.Y. (2001). "A feasibility study on the deep soil mixing barrier to control contaminated groundwater." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 6, No. 3, pp. 53-59.
- [5] Lee, S.W., Jeoung, J.H., Hwang, J.H. (2009). "Evaluation of hydrophilic waterstop for shield TBM tunnel under high water pressure." *Proceedings of Korean Geo-Environmental Conference*, Seoul, Korea, pp.389-392.

- [6] Ławniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A.P., Heipieper, H.J., Chrzanowski, Ł. (2020). "Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: A review." *Molecules*, Vol. 25, p. 856.
- [7] Ministry of Environment (2007). *Guidelines for Cleaning Contaminated Soil*, 11-1480000-000841-01, Sejong-si, Korea, p. 214.
- [8] Ministry of Environment (2009). *Purification of Pollution Guideline; Environment of Korea*, Sejong-si, Korea.
- [9] Park, J.J., Kim, S.H. (2018). "Field investigation for identification of contamination sources in petroleum-contaminated site." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 2, pp. 141-153.
- [10] Shackelford, D.D., Meier, A., Sample-Lord, K. (2016). "Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner." *Geotextile and Geomembrane*, Vol. 44, pp. 707-718.
- [11] Tang, Z., Zhang, L., Huang, Q., Yang, Y., Nie, Z., Cheng, J., Yang, J., Wang, Y., Chao, M. (2015). "Contamination and risk of heavy metals in soils and sediments from a typical plastic waste recycling area in North China." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 112, pp. 343-351.
- [12] Teefy, D.A. (1997). "Remediation technologies screening matrix and reference guide: Version III." *Remediation Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 115-121.
- [13] U.S. EPA (2001). *Cost Analyses for Selected Groundwater Cleanup Projects; Pump and Treat System and Permeable Reactive Barriers, Solid Waste and Emergency Response(5102G)*, USEPA, 542-R-00-013.
- [14] Wu, H.N., Shen, S.L., Liao, S.M., Yin Z.Y. (2015). "Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental ring." *Tunnel Underground Space Technology*, Vol. 50, pp. 317-323.
- [15] Xue, Q., Zhang, Q., Liu, L. (2012). "Impact of high concentration solutions on hydraulic properties of geosynthetic clay liner materials." *Materials*, Vol. 5, pp. 2326-2341.
- [16] Yun, S.Y., An, H.K., Oh, M., Lee, J.Y. (2019). "A study on the evaluation of permeability and structure for calcium bentonite-sand mixtures." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-10.