

# 수팽창 지수재의 방수 성능 및 내구성 평가

최우용<sup>1</sup> · 이현필<sup>2</sup> · 전기찬<sup>3</sup> · 이석원<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사

<sup>2</sup>비회원, (주)본이앤씨 대리

<sup>3</sup>정회원, 대한건설 ENG 상무

<sup>4</sup>정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

## Evaluation of waterproof and durability of hydrophilic waterstop

Woo-Yong Choi<sup>1</sup>, Hyeun-Pil Lee<sup>2</sup>, Gy-Chan Jun<sup>3</sup>, Seok-Won Lee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

<sup>2</sup>Bon E&C, Deputy

<sup>3</sup>Korea Engineering & Construction, Director

<sup>4</sup>Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Professor

**ABSTRACT:** The interest in the use of shield TBM (Tunnel Boring Machine) on the tunnel excavation has been increased rapidly in Korea. The shield TBM tunnel is generally designed as non-drainage tunnel. Consequently, if water leakage through the segment joints happens, big problems on the usage and stability of tunnel can be occurred. In this study, the variation of waterproof capacity of hydrophilic waterstop by the construction error and excessive displacement of segment was studied firstly. Secondly, the decrease of durability of hydrophilic waterstop by the sulphate and chloride contained in the groundwater and seawater was investigated. The results showed that if the angle discordance at the segment joints is beyond the 2 degree, the proper waterproof capacity of hydrophilic waterstop can not be guaranteed. In addition, if the hydrophilic rubber waterstop is exposed to the sulphate for a while, the proper durability of hydrophilic waterstop can not be expected.

**Keywords:** Hydrophilic waterstop, Waterproof, Durability, Sulphate, Chloride

**초 록:** 최근 국내에서는 실드 TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용한 터널 굴착에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 실드 TBM 터널은 비배수 터널로써 세그먼트 이음부에서 누수가 발생할 경우에는 터널의 사용성 및 안정성에 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 첫째로 실드 TBM 터널의 세그먼트 시공 시 시공오차 및 세그먼트 과다변형에 의한 수팽창 지수재의 방수 성능 변화를 알아보고, 두 번째로 지하수와 해수에 있을 수 있는 황산염과 염화물에 의한 수팽창 지수재의 내구성 저하를 알아보았다. 시험결과, 체결각 불합치가 2° 이상으로 시공 오차가 발생한 경우에는 수팽창 지수재의 차수 능력을 기대하기는 어려운 것으로 판단된다. 또한 수팽창 지수재가 황산마그네슘 용액에 장시간 노출될 경우에는 지수재의 내구 성능에 문제가 있을 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 수팽창 지수재, 방수 성능, 내구성, 황산염, 염화물

## 1. 서 론

최근 국내에서는 실드 TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용한 터널 굴착에 대한 관심이 크게 증가하고

있다(Kim et al., 2002; Hyun et al., 2012; Kim et al., 2013). 대부분 배수 터널인 NATM 터널과는 다르게 실드 TBM 터널은 비배수 터널로써, 세그먼트 이음부에서 누수가 발생할 경우에는 터널의 사용성 및 안정성에 문제가 될 수 있다. 현재 국내에서는 여러 가지 방수재료 중에서 세그먼트 이음부의 방수성능을 확보하기 위하여 물과의 반응에 의하여 팽창을 일으켜 지수재 홈에 의해 구속되는 반발력으로 수압에

\*Corresponding author: Seok-Won Lee

E-mail: swlee@konkuk.ac.kr

Received January 24, 2014; Revised February 10, 2014;

Accepted February 25, 2014

저항하며 방수효과를 나타내는 수팽창 지수재를 대부분 사용하고 있다. 기존 수팽창 지수재에 대한 연구는 대부분 재료적인 특성 연구에 국한되어 있었다. 즉, 세그먼트 변형 발생 및 시공오차 조건에서의 수팽창 지수재의 방수성능 평가 및 화학적 성분에 의한 내구성 감소 평가에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.

세그먼트 이음부를 통한 일반적인 누수 원인을 살펴보면, 시공 시 시공오차 및 세그먼트 파손, 세그먼트 과다 변형, 이음부 방수재의 탈락, 지수재의 내구성 저하 등을 꼽을 수 있다. 이 중 세그먼트 시공 시 시공오차 및 과다 변형이 누수의 주요 원인이라고 할 수 있다(Shin, 2008). 장기적인 누수의 원인으로는 지하수 및 해수에 포함되어 있는 화학물질들에 의한 지수재의 내구성 저하를 들 수 있다. Lee et al. (2009)은 세그먼트 라이닝 조립 시 부등침하 등으로 인한 라이닝 체결각에 대한 불합치가 일어난 경우, 수팽창 지수재의 방수성능을 평가하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 일반 수팽창 지수재(20 mm × 10 mm)를 사용하여 지수재의 팽창에 따른 누수량을 측정하였고, 세그먼트 간 체결각 불합치에 의한 시공오차를 중점적으로 연구하였다. 본 연구에서는 기존 연구와 다르게 쉴드 터널용 수팽창 지수재(20 mm × 5 mm)를 사용하였고, 세그먼트 간 체결각 불일치(angle discordance)는 물론, 세그먼트 이음부의 엇갈림(offset)에 의한 방수 성능 저하에 대한 연구를 수행하였다. 장기 내구성 관점에서, 해수에는 일반적으로 55%의 염화물(chloride)와 30%의 나트륨(sodium)이 주를 이루는 것으로 알려져 있으며, 일반 지하수를 구성하는 주요 소 중에 황산염(sulphate)이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 지하수 및 해수에 있을 수 있는 황산염(sulphate)과 염화물(chloride)에 의한 지수재의 내구성 저하에 대한 연구를 수행하였다.

첫째로 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 시공 시 시공오차 및 세그먼트 과다변형에 의한 수팽창 지수재의 방수 성능 변화를 알아보았다. 이를 위하여 정상 시공 상태, 엇갈림 5 mm 및 10 mm, 그리고 체결각 불합치 1°, 2°, 3°의 상황에서 침투 수압을 각각 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 으로 가압하여 실험적으로 누수량을 산정하고 이를 토대로 투수계수를 계산함으로써 방수 성능의 변화를 평가하였다. 또한 산정된 투수계수를 실제 쉴드 TBM 터널에 적용하여 누수량을 산정하였다. 두 번째로 지하수와 해수에 있을 수 있는 황산염과 염화물에 의한 수팽창 지수재의 내구성 저하를 알아보았다. 이를 위하여 지하수를 모사한 황산마그네슘 1%, 3%, 5% 농도의 용액 및 해수를 모사한 염화물 3.5% 농도의 용액을 준비하여, 수팽창 지수재를 각각 7일, 15일 및 30일 동안 침지시킨 후 수팽창 지수재의 방수성능의 변화를 앞서서와 동일한 방법으로 시험을 수행하여 성능저하를 알아보았다.

## 2. 시험 재료 및 계획

### 2.1 시험 재료 및 장비

본 연구에 사용된 수팽창 지수재는 Fig. 1과 같이 폭 20 mm, 두께 5 mm의 쉴드 터널용 수팽창 지수재이다. Table 1은 사용된 수팽창 지수재의 물리적 성질을 나타낸다.

본 연구에서는 지수재의 방수성능을 측정하기 위하여, Fig. 2와 같이 Lee et al. (2009)의 연구에서 사용된 수팽창 지수재 방수 성능 시험 장비를 개조하여 사용하였다. 이 장비는 세그먼트 이음부를 모사한 부분에 수팽창 지수재를 설치(Fig. 3) 한 후, 이곳에 물에 압력을 가하여(Fig. 4) 통과시켜면서 누수량(투수계

Table 1. Physical properties of hydrophilic rubber waterstop

Hardness (Hs)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Swelling volume (%)
33~55	2.45 above	500 above	300~500



Fig. 1. Hydrophilic rubber waterstop

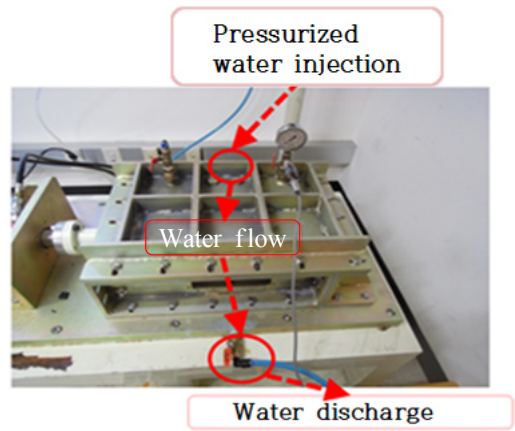


Fig. 4. Pressurized water flow



Fig. 2. Test apparatus

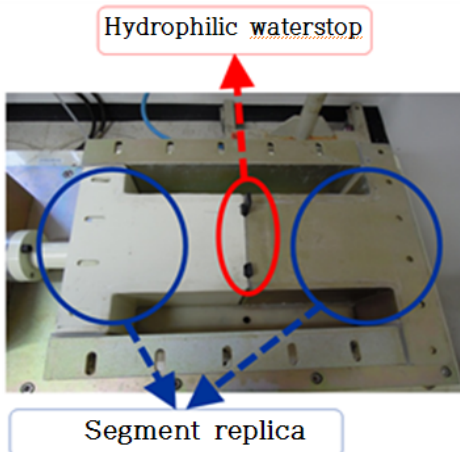


Fig. 3. Installation of hydrophilic waterstop

수를 측정하는 장치이다. 기존 장비와 다른 점은 가압 수조를 설치함으로써 배면에서 물을 통과 시킬 때에 가압 수조에 콤프레셔를 사용하여 압력을 주어 원하는 수압 모사 및 실시간으로 조절 할 수 있게 하였다.

## 2.2 시험 계획

본 연구에서는 우선 쉘드 TBM 터널의 세그먼트 시공 시 시공오차 및 세그먼트 과다변형에 의한 수팽창 지수재 방수 성능을 알아보았다. 이를 위하여 정상적으로 시공이 완료된 상황을 재현하여 시험하고, Fig. 5(a)와 같이 세그먼트의 엇갈림(offset) 시공오차에 대한 시험은 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa의 침투 수압으로 각각 시험을 실시하고, Fig. 5(b)와 같이 체결각 불합치(angle discordance) 시공오차에 대해서는 200 kPa의 침투 수압으로만 시험을 실시하였다. 엇갈림(offset)에 의한 시공 오차는 5 mm 및 10 mm의 조건으로 시험을 실시하였고, 체결각 불합치의 경우는 1°, 2°, 및 3°에 대하여 시험을 실시하였다.

두 번째로 지하수와 해수에 의한 수팽창 지수재의 성능 저하를 알아보기 위하여 지하수를 모사한 황산 마그네슘 용액을 1%, 3%, 5%의 농도로 준비하였고, 해수를 모사한 염화물 3.5% 농도의 용액을 준비하였다. 이 용액에 수팽창 지수재를 침지 시킨 후, 7일,

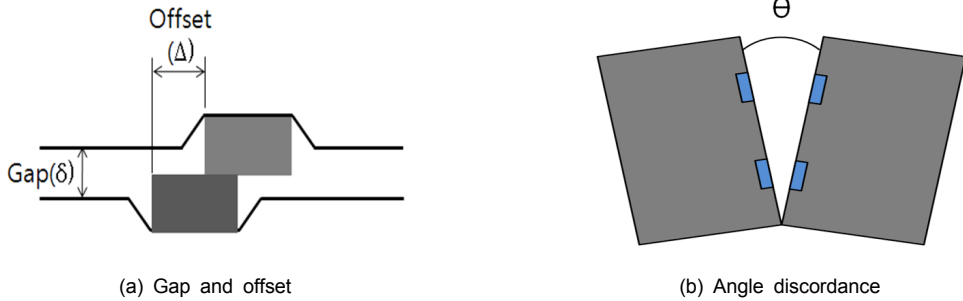


Fig. 5. Simulation of possible leakage due to construction error

15일, 그리고 30일이 경과 되었을 때 수팽창 지수재를 꺼내었다. 이 때, 수팽창 지수재는 이미 팽창된 상태이므로 실험 장비에 설치할 수 없다. 따라서 상온에서 건조시켜, 초기와 같은 크기로 수축 시킨 후 실험장비에 장착하여 방수성능 시험을 수행하고, 이를 토대로 내구성 변화를 조사하였다. 대조군으로 일반 물에 수팽창 지수재를 동일기간 침지 및 건조 후, 동일한 방법으로 시험을 진행하였다.

누수량 측정 간격은 0.1초로 설정하였고, 24시간에 한 번씩 누수량을 측정하였다. 누수량 측정을 하지 않을 때의 수팽창 지수재는 장치 내에 저장된 용액에 의해 시간이 지날수록 팽창하게 되고, 이에 따라 방수 성능을 점차 발휘하게 된다. 누수량 측정은 원칙적으로 누수가 멈출 때까지 측정하는 것으로 하였으나, 다만 누수가 멈추지 않는 경우에는 216시간까지 누수량을 측정한 후 시험을 종료하였다. 누수량을 토대로 투수계수를 산정하여 방수 성능의 지표로 삼았다.

서 각각 침투수압 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa를 작용시켰을 경우, 수팽창 지수재의 수침 시간(immersed time)에 따른 투수계수(hydraulic conductivity)의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7 및 Fig. 8은 엇갈림(offset) 5 mm 및 10 mm 시공 상황에서 각각 침투수압 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa를 작용시켰을 경우, 수팽창 지수재의 수침 시간에 따른 투수계수 변화를 각각

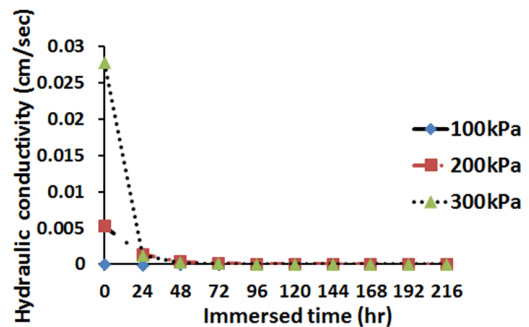


Fig. 6. Normal construction

### 3. 시공오차에 의한 성능 변화

#### 3.1 수팽창 지수재의 투수계수 변화

정상시공, 엇갈림 5 mm, 엇갈림 10 mm, 그리고 체결각 불합치 1°, 2°, 3°에서의 수팽창 지수재 방수 성능(투수계수) 측정 결과를 Fig. 6~Fig. 9에 나타내었다. Fig. 6은 엇갈림 및 체결각 불합치의 시공오차가 발생하지 않은 정상시공(normal construction) 상황에

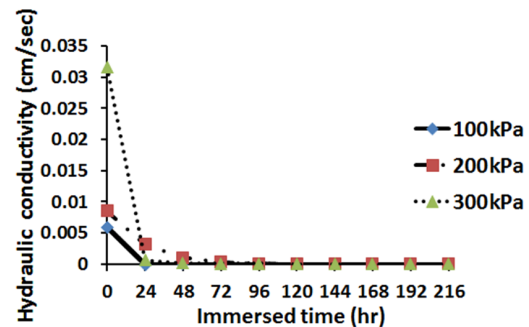


Fig. 7. Offset 5 mm

보여주고 있다. Fig. 9는 체결각 불합치 1°, 2°, 및 3°시공 상황에서 침투수압이 200 kPa일 경우, 수팽창 지수재의 수침 시간에 따른 투수계수 변화를 각각 보여주고 있다.

Fig. 6~8에서 알 수 있듯이 침투 수압을 100 kPa로 가압하였을 경우에는, 정상시공 조건에서는 처음부터 누수가 발생하지 않았고, 나머지 시공 조건(엇갈림 5 mm 및 엇갈림 10 mm)에서는 모두 하루 만에 투수계수가 '0'으로 수렴하여 방수 성능을 충분히 발휘하였다. 침투 수압이 200 kPa로 가압하였을 경우에는, 정상시공 조건에서는 수팽창 지수재의 방수 능력은 96시간이 지나면 발휘되었고, 엇갈림 5 mm 일 때는 120시간, 엇갈림 10 mm 일 때는 216시간이 지났을 때 수팽창 지수재의 방수 능력이 충분히 발휘되었다. 결국 시간적 차이는 있을 수 있지만, 시험을 수행한 216시간 이내에 모든 엇갈림 시공조건에서 수팽창

지수재가 방수 성능을 충분히 발휘하였다. 침투 수압이 300 kPa 일 경우에는, 초기 투수계수가 다른 수압 조건과 비교하여 매우 크게 나타났지만, 시간이 지남에 따라 빠르게 회복하여 수압 200 kPa의 경우와 동일하게 시험을 수행한 216시간 이내에 모든 엇갈림 시공조건에서 수팽창 지수재가 방수 성능을 충분히 발휘하였다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이, 체결각 불합치 1°에서는 수팽창 지수재의 방수 능력이 216시간 경과 후 충분히 발휘되었다. 즉, 수팽창 지수재를 216시간 수침을 시킨 후에 투수계수가 0으로 수렴하였다. 그러나 체결각 불합치 2° 및 3°의 경우에는 216시간이 지나도 수팽창 지수재의 투수계수가 '0'으로 수렴하지 않고 누수가 계속 발생하였다. 특히 체결각 불합치 3°에서는 216시간이 경과하여도 상당한 크기의 투수계수가 유지됨을 알 수 있다. 결국 체결각 불합치가 2°이상으로 시공 오차가 발생할 경우에는 수팽창 지수재의 치수 능력을 기대하기는 어려운 것으로 판단된다.

단 제시한 방수성능 연구결과는 본 실험에 사용된 수팽창 지수재의 규모, 성능(팽창성 등), 설치간격 그리고 세그먼트의 규모에 해당하는 결과로서 실험 제원이 바뀌면 연구결과가 달라질 수 있다.

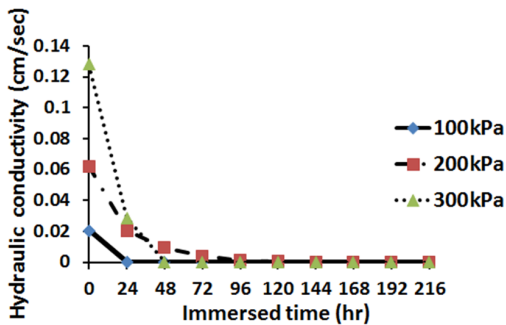


Fig. 8. Offset 10 mm

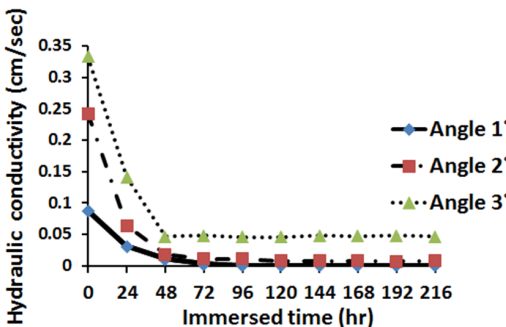


Fig. 9. Angle discordance

### 3.2 투수계수 변화에 따른 누수량 산정

전술한 바와 같이 수팽창 지수재는 방수 능력을 발휘하기 위해서는 일정한 수침시간이 필요하며, 심지어 체결각 불합치 2° 및 3° 조건에서는 수침시간이 216시간을 넘어도 방수 능력을 완전히 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 정상시공 조건, 엇갈림 조건, 체결각 불합치 조건에서 수침시간이 경과함에 따라 터널 내로 유입되는 누수량을 2차원 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 구해 보았다. 즉, 전절에서 산정된 투수계수를 적용하여 누수량을 산정하였다.

시공조건은 정상시공, 엇갈림 5 mm, 엇갈림 10 mm, 체결각 불합치 1°, 체결각 불합치 2°, 그리고

체결각 불합치 3°의 총 6가지 경우이다. 터널이 건설되는 지반 조건을 풍화암 지반으로 가정하여 투수계수를  $1.0 \times 10^{-3}$  cm/sec로 설정하였다(Ahn, 2005). 세그먼트의 투수계수는 콘크리트의 투수계수를 참조하여  $1.0 \times 10^{-10}$  cm/sec로 설정하였다. 실드 TBM 터널 이음부의 투수계수 값은 전절에서 시험을 통하여 얻은 값 중에서 침투 수압을 200 kPa로 가압하였을 경우에 산출된 시험 결과를 사용하였다. 단, 수침시간에 따른 수팽창 지수재의 투수계수 변화 시험결과에서, 수팽창 지수재의 투수계수 결과 값이 '0'이 되는 경우는 수치해석에서 세그먼트 이음부(수팽창 지수재)의 투수계수를 세그먼트의 투수계수와 동일한  $1.0 \times 10^{-10}$  cm/sec로 설정하였다. 터널 해석 단면은 지표면 기준 20 m 지하에 직경 7 m의 터널이 굴착되었다고 가정하였으며, 해석 범위는 가로 100 m, 높이 44 m로 설정하였다. 세그먼트의 개수는 8개로 가정하였으며, 세그먼트와 세그먼트 사이에 지수재가 설치되는 것으로 모델링하였다.

수치해석을 통하여 산정한 터널 내 누수량을 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 중요한 사실은 체결각 불합치 2°와 3°조건에서는 터널 내 누수량이 216시간이 지난 후에도 배수량이  $5.0 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/sec/m 보다 많이 발생한다는 것이다. 결국 체결각 불합치 2°와 3°조건에서는 터널 내 방수에 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

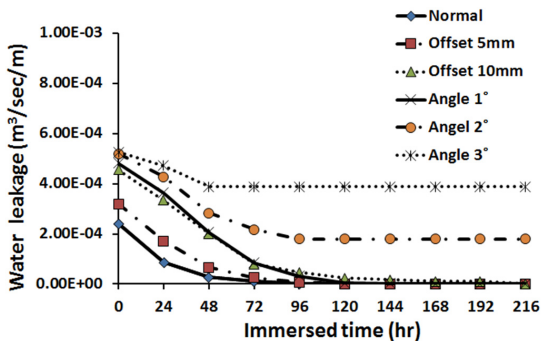


Fig. 10. Water leakage

#### 4. 내구 성능 평가

지하수와 해수에 있을 수 있는 황산염과 염화물에 의한 수팽창 지수재의 내구성 저하를 알아보았다. 이를 위하여 지하수를 모사한 황산마그네슘 1%, 3%, 5% 농도의 용액 및 해수를 모사한 염화물 3.5% 농도의 용액을 준비하여, 수팽창 지수재를 각각 7일, 15일 및 30일 동안 침지시킨 후 수팽창 지수재의 방수성능 변화를 앞서와 동일한 방법으로 시험을 수행하였다. 대조군으로 일반 물에 수팽창 지수재를 동일기간 침지시킨 후 꺼내어 말린 후, 동일한 방법으로 시험을 진행하였다. 물, 염화물 3.5%, 황산마그네슘 1%, 황산마그네슘 3%, 황산마그네슘 5%에 해당하는 시험 결과를 Fig. 11~Fig. 15에 각각 나타내었다. 이때 작용된 침투수압은 200 kPa이다.

Figs. 11 및 12에서 알 수 있듯이 물에 침지시킨 수팽창 지수재는 침지 기간이 30일 이내일 경우 24시간 만에 투수계수가 '0'이 되어 방수 능력이 발휘

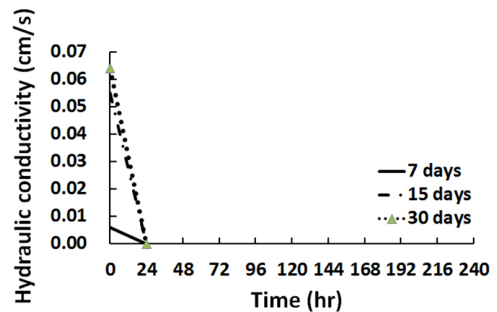


Fig. 11. Water

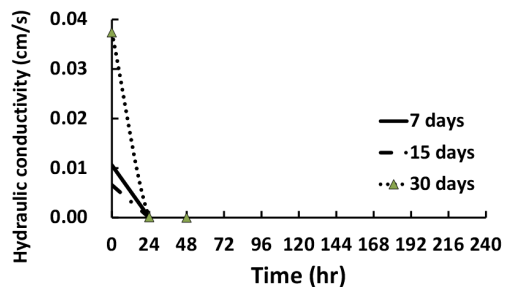


Fig. 12. Chloride 3.5%

되었다. 염화물 3.5% 용액에 침지 시킨 시편은 침지 후 7일 및 15일의 경우는 24시간 만에 방수 능력이 발휘 되었으나, 침지 후 30일이 지난 경우에는 48시간 만에 투수계수가 '0'이 되어 완전한 방수 능력을 나타 내었다.

Fig. 13~Fig. 15에서 알 수 있듯이 황산마그네슘 용액 1%와 3%의 경우에는 침지 후 15일 까지는 120시간 이후에 방수 능력이 발휘 되었지만, 침지 후 30일이 지난 경우는 거의 일정한 투수계수를 보이며 누수가

계속 발생하였다. 황산마그네슘 5% 용액에 침지 시킨 시편은 침지 후 7일의 경우 192시간이 지난 후 투수계 수가 '0'이 되어 방수 능력이 발휘 되었으나, 침지 후 15일 및 30일의 경우에는 누수가 계속 발생하였다. 결국 수팽창 지수재의 방수능력을 상실하게 되었다.

결국 해수염 3.5% 용액에 침지 시킨 수팽창 지수재 의 방수성능은 시간적 차이가 있기는 하지만 물에 수침 시킨 수팽창 지수재와 비교하여 크게 저하되지 않아 이 농도에서는 내구성에 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 이러한 판단은 본 실험이 진행된 시간이내의 연구결과로서, 해저터널 등에 장기간 노출되었을 경우에는 다른 결과를 양산할 수도 있다. 팽창 지수재가 황산마그네슘 용액에 장시간 노출될 경우는 지수재의 내구 성능에 문제가 있을 수 있음을 알 수 있었다.

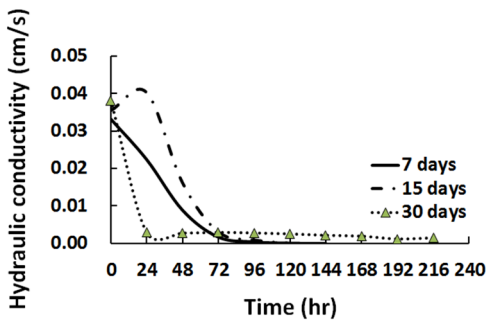


Fig. 13. Sulphate 1%

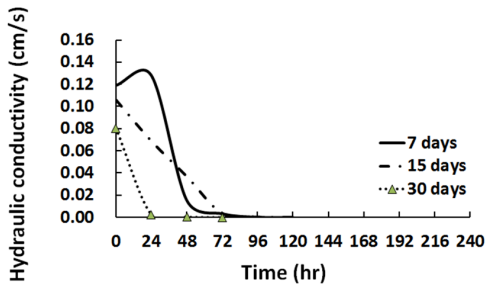


Fig. 14. Sulphate 3%

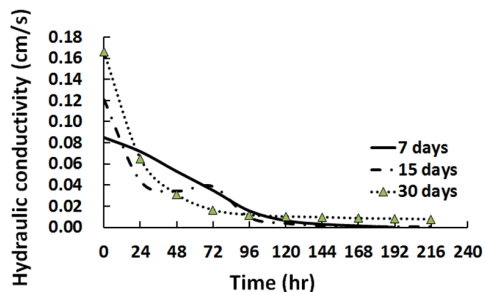


Fig. 15. Sulphate 5%

## 5. 결론

본 연구에서는 첫째로 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 시공 시 시공오차 및 세그먼트 과다변형에 의한 수팽창 지수재의 방수 성능 변화를 알아보았고, 두 번째로 지하수와 해수에 있을 수 있는 황산염과 염화물에 의한 수팽창 지수재의 내구성 저하를 알아보았다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 10 mm 이내로 엇갈림 시공이 이루어진 경우, 시간적 차이는 있을 수 있지만 수행한 모든 시험조건에서 일정시간이 경과하면 수팽창 지수재는 충분한 방수 성능을 확보하였다.
2. 체결각 불합치가 2°이상으로 시공 오차가 발생한 경우, 상당시간이 지나도 누수가 계속 발생하여 수팽창 지수재의 차수 능력을 기대하기는 어려운 것으로 판단된다.
3. 해수염 3.5% 용액에 침지 시킨 수팽창 지수재의 방수 성능은 일반 물에 침지 시킨 수팽창 지수재에 비해 크게 저하되지 않는 것으로 나타났다.

4. 황산마그네슘 용액에 침지시킨 수팽창 지수재의 경우 1%, 3%, 5% 용액 모두 실험 시작 후 최소 120시간 이상이 되어야 방수 성능이 나타났다. 또한 1%, 3% 용액에 30일 침지 시킨 경우와 5% 용액에 15일 이상 침지 시킨 경우에는 방수 성능을 제대로 발휘하지 못하였다. 따라서 수팽창 지수재가 황산마그네슘 용액에 장시간 노출될 경우는 지수재의 내구 성능에 문제가 있을 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Ahn, S.I. (2005), "Analyses of ground-water by impacts of tunneling", Master dissertation, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
2. Hyun, K.C., Min, S.Y., Moon, J.B., Jeong, G.H., Lee, I.M. (2012), "Risk management applicable to shield TBM tunnel: I. Risk factor analysis", J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 667-681.
3. Kim, Y.I., Hencher, S.R., Yoon, Y.H., Cho, S.K. (2002), "Determination of the construction method for Young Dong tunnel by risk assessment", J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 2, pp. 13-25.
4. Kim, S.H., Kim, W.K., Lee, H.Y. (2013), "Effect of segment thickness during shield TBM tunnelling in case study", J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 311-320.
5. Lee, S.W., Jeoung, J.H., Hwang, J.H. (2009), "Evaluation of hydrophilic waterstop for shield TBM tunnel under high water pressure", Proc. of Korean Geo-Environmental Conference, Seoul, Korea, pp. 389-392.
6. Shin, Y.S. (2008), "Study on hydraulic tunnel-ground interaction", Ph.D dissertation, Konkuk University, Seoul, Korea.