세그먼트 시공오차에 따른 이음부 지수재별 방수성능 평가

허승무[1] · 정 훈[1] · 이석원[2*]

[1]비회원, 건국대학교 사회환경공학부 석사
[2]정회원, 건국대학교 사회환경공학부 교수

Waterproofing performance evaluation according to each waterproofing material due to segment construction error

Seung-Mu Heo[1] · Hoon Jung[1] · Seok-Won Lee[2*]

[1]Master, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University
[2]Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University

***Corresponding Author :** Seok-Won Lee, swlee@konkuk.ac.kr

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 rubber waterstop and gasket, respectively by the construction error and excessive displacement of segment was studied. The test results show that hydrophilic rubber waterstop has favorable on the offset, however unfavorable on the gap. On the other hand, gasket has unfavorable on the offset, however favorable on the gap.

Keywords: Hydrophilic rubber waterstop, Gasket, Shield TBM, Waterproofing, Segment

초 록

최근 국내에서는 쉴드 TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용한 터널 굴착에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 쉴드 TBM 터널은 비배수 터널로써 세그먼트 이음부에서 누수가 발생할 경우에는 터널의 사용성 및 안정성에 문제가 될 수 있다. 본 연구에서는 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 시공 시 시공오차 및 세그먼트 과다변형에 의한 수팽창 지수재 및 가스켓 각각의 방수 성능을 검토하였다. 실험결과, 수팽창 지수재는 엇갈림에 대해서는 대응성이 좋으나, 틈새 간격에 대해서는 대응성이 불리한 것으로 나타났다. 반면에 가스켓은 틈새 간격에 대해서는 대응성이 좋으나, 엇갈림에 대해서는 대응성이 불리한 것으로 나타났다.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(6)1023-1037(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.1023

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 5, 2018
Revised October 22, 2018
Accepted October 25, 2018

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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

주요어: 수팽창지수재, 가스켓, 쉴드 TBM, 방수, 세그먼트

1. 서 론

우리나라는 매우 높은 도시 인구 비율 때문에 도로, 철도, 지하철, 전력/통신 시설 등 인프라 시설 과밀화 현상으로 인한 지하 공간 활용에 중요성이 커짐에 따라 지하구조물의 시공이 증가하고 있다. 이러한 동향으로 인하여 쉴드 TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용한 터널/공동구 굴착에 대한 관심이 크게 증가하고 있다(Kim et al., 2002; Hyun et al., 2012; Kim et al., 2013). 세그먼트 이음부에서 누수가 발생할 경우에는 터널의 사용성 및 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 현재 국내에서는 여러 가지 방수재료 중에서 세그먼트 이음부의 방수성능을 확보하기 위하여 물과의 반응에 의하여 팽창을 일으켜 수압에 저항하며 방수효과를 나타내는 수팽창 지수재(hydrophilic rubber waterstop)를 대부분 적용하고 있다. 그러나 일본을 제외한 대부분의 선진국에서는 고무의 압착을 통하여 방수기능을 수행하는 가스켓(gasket)을 일반적으로 적용하고 있다.

선행연구를 살펴보면, Lee et al. (2009)은 세그먼트 라이닝 조립 시 부등침하 등으로 인하여 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. Choi et al. (2014)은 쉴드 터널용 수팽창 지수재(20 mm × 5 mm)를 사용하여 세그먼트 간 체결각 불일치(angle discordance)는 물론, 세그먼트 이음부의 엇갈림(offset)에 의한 방수성능 저하에 대한 연구를 수행하였다. 또한 장기 내구성 관점에서 지하수 및 해수에 있을 수 있는 황산염(sulphate)과 염화물(chloride)에 의한 지수재의 내구성 저하에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 우선 쉴드 TBM 터널의 누수원인을 문헌조사를 통하여 조사 분석하였다. 이를 토대로 다양한 세그먼트 시공 오차에 따른 수팽창 지수재 및 가스켓 각각에 대한 방수성능을 평가하여 그 적용성을 검토하였다. 여기에서 적용한 시공 오차는 체결각 불일치 또는 벌어진 틈새를 의미하는 틈새 간격(gap)과 지수재가 정확히 맞물리지 못하고 엇갈려서 시공되는 엇갈림(offset)을 적용하였다. 방수성능 평가를 위하여 현재 쉴드 TBM 터널에서 방수재로 사용하는 수팽창 지수재와 가스켓 각각에 대하여 내수압 실험을 수행하여 방수 성능을 평가하고, 결과를 비교·분석하여 시공오차에 대한 대응성을 조사하였다. 수팽창 지수재의 경우, 지수재의 두께가 4 mm로 틈새 간격(gap) 조건을 크게 주고 실험을 할 수가 없다. 따라서 틈새 간격을 3 mm부터 1 mm 씩 증가 시켜 실험을 하였고, 엇갈림 조건을 0 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm로 나누어서 실험을 실시하였다. 가스켓(gasket)의 경우, 높이 16 mm, 너비 26 mm의 복합형(composite type) 가스켓을 선정하여 틈새 간격은 3 mm, 5 mm, 7 mm이고 엇갈림은 5 mm, 7 mm, 10 mm로 설정하여 실험을 수행하였다. 가해진 수압은 20 bar를 최대 수압으로 적용하여 실험을 실시하였다.

2. 세그먼트 누수 원인 및 현황

세그먼트는 일반적으로 5~7 조각의 세그먼트로 실내 공장에서 제작되고 이를 현장에 운반하여 터널 내부에서 볼트를 이용하여 조립되고 있다. 세그먼트와 세그먼트 사이를 이음부라고 하고 세그먼트 이음부에서 방수성능이 저하하는 주 원인은 시공오차에 따른 이음부 방수재(수팽창 지수재, 가스켓 등)의 접촉 면적을 줄이는 세그먼트 틈새 간격(gap)과 엇갈림(offset)에 의해 주로 발생된다고 할 수 있다. Fig. 1은 틈새 간격(gap)과 엇갈림(offset)의 정의를 나타내고 있다. 틈새 간격(gap)과 엇갈림(offset)은 세그먼트의 자체 중량, 상재하중, 토압 등으로 인하여 세그먼트의 처짐 및 단차가 발생으로 생길 수 있다. 세그먼트의 체결방식에 의해 시공오차가 발생할 수 있는데 볼트 직경과 볼트 홀의 직경이 다르기 때문에 직경의 차이로 엇갈림(offset)이 발생할 수 있다. 터널 시공 시 진동과 충격으로 볼트가 풀리는 현상으로 세그먼트의 체결이 약해져 시공오차가 발생할 수도 있다. 볼트 체결부의 위치가 세그먼트 단면의 중심축보다 아래에 있는 경우 편심이 작용하여 틈새 간격(gap)이 발생할 수 있으며, 이러한 간격발생이 누수의 원인이 된다.

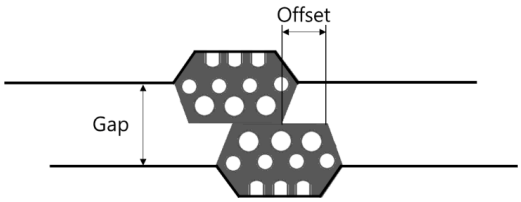


Fig. 1. Definition of gap and offset

곡선구간을 포함하고 있는 해외 2개 현장의 실제 누수 데이터를 분석하였다. 현장 #1은 1916링 중에 507링에 누수가 발생하였고, 현장 #2는 2150링 중에 249링에서 누수가 발생하였다. 2개 현장의 누수원인은 각각 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다. 2개의 현장 모두 세그먼트 이음부 누수가 현장 #1에서 36%, 현장 #2에서 52%로 가장 큰 원인으로 나타났고, 다음으로 그라우트 주입구, 볼트 체결부, 크랙으로 인한 세그먼트 누수 순으로 나타났다. 따라서 세그먼트 이음부의 누수 문제가 가장 심각한 것으로 조사되었다.

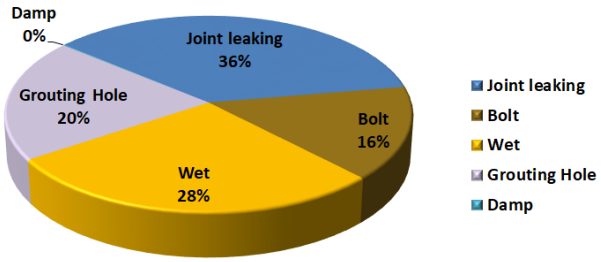


Fig. 2. Cause of water leakage (construction site #1)

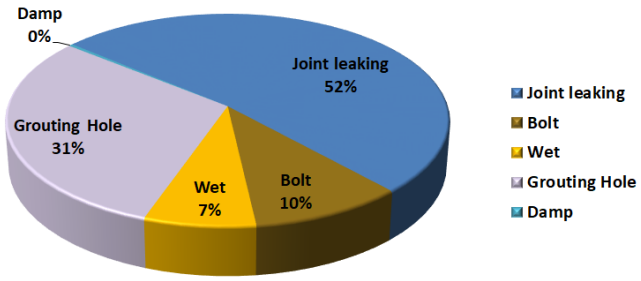


Fig. 3. Cause of water leakage (construction site #2)

국내 누수에 대한 데이터는 "특수굴착터널(쉴드터널) 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 개발"(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2013) 중 터널 주요 손상원인 조사 자료를 참고하여 5개 현장의 누수를 분석한 결과, 이음부와 볼트부와 뒤채움 주입공에서 누수가 가장 많이 발생하는 것으로 조사되었다. 누수는 수팽창 지수재의 두께 부족, 팽창 성능 저하, 지수재의 손상, 시공오차로 인한 지수재 방수성능 저하, 세그먼트 균열, 볼트 풀림 현상으로 인한 볼트부 누수, 뒤채움재의 불균일한 충전 등의 원인으로 나타났다.

3. 세그먼트 지수재

3.1 지수재 종류 및 특성

일반적으로 쉴드 TBM 터널에서 지수재는 터널 내부로 유입되는 물을 차단하기 위해 세그먼트와 세그먼트, 링과 링 접합부에 설치하는 고무재질의 차수재이다. 지수재의 일반적인 종류에는 물과의 반응으로 인한 팽창압으로 지수성능을 발휘하는 수팽창 지수재(hydrophilic rubber waterstop)와 탄성 고무의 압축력으로 지수성능을 발휘하는 가스켓(gasket) 지수재가 있다. 수팽창 지수재는 재료가 지닌 흡수 특수성이 구속조건하에서 발휘되는 팽창압과 건조 상태에서는 지수재가 가지고 있는 탄성반력의 2가지 지수원리를 이용한 방수재이며 현재 국내와 일본에서 세그먼트 지수재의 재료로 많이 적용되고 있다. 고무 가스켓은 탄성 반발력에 의한 접면압력으로 방수하는 원리이며, 유럽에서 주로 사용되고 있는 세그먼트용 방수재이다. 특히 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) 고무 가스켓은 응력완화나 장기적인 내구성에 대해서도 충분한 검토 및 평가가 이루어져 있다.

현재 국·내외에서 사용하는 지수재는 수팽창 지수재, 수팽창성 복합고무 지수재, 가스켓, 수팽창성 복합 고무 가스켓 지수재로 크게 4가지로 대별될 수 있다. 일반적으로 사용하는 지수재는 수팽창 지수재와 가스켓 지수재이며, 일반 지수재의 방수능력을 보완하기 위해 다양한 종류의 지수재가 개발되었다. 수팽창성 복합고무 지수재는 수팽창 지수재 양옆에 비팽창성 고무를 설치한 것이고, 수팽창성 복합 고무 가스켓 지수재는 가스켓 지수재에 수팽창 지수재를 결합한 지수재이다.

3.2 지수재 별 특성 분석

수팽창 지수재(hydrophilic rubber waterstop)가 쉴드 TBM 터널에서 담당하는 역할은 고수압, 간극변동에 의한 지수 성능 유지, 반복압축에 의한 복원력 유지, 팽창 성능에 의한 연결부 지수, 완전 밀착에 의한 시공성 향상 등이다. 일반적으로 팽창률이 3~5배로 부피가 증가하고, 4 mm에서 압축이 일어나며, 1~2 mm의 시공오차가 발생할 수 있다. 또한 터널 주변에 지하수나 해수가 존재하여 장기간 노출이 될 경우, 지하수나 해수에 포함된 황산염이나 염화물에 의해 열화가 일어나 방수 성능이 저하될 수 있다(Choi et al., 2014). 일반적으로 시공이 용이하고, 경제성이 우수하며 시공경험이 풍부하다는 장점을 가지고 있다. 반면에 팽창 고무의 강도가 작아 고수압 작용 및 세그먼트 시공 시 파손될 우려가 있고, 염분성의 물에는 팽창효과가 저조하거나, 건조 수축 시 수축으로 인한 누수의 위험이 있을 수 있으며, 시공오차에 대한 대응성이 약하며 팽창 고무의 내구성이 불확실하다는 단점을 가지고 있다고 알려져 있다.

가스켓(gasket)은 유럽에서 가장 널리 이용되는 세그먼트용 방수재로 탄성반발력에 의한 접면압력으로 방수하는 방식이다. 가스켓은 EPDM 고무 가스켓을 일반적으로 사용하며 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) 재질의 가스켓 지수재는 내구성이 우수한 고무에 요철과 내부 공극의 복합적인 반발탄성력과 압축성을 가진다. 또한 내구성, 화학적 저항성, 내열성 등이 우수하기 때문에 가장 많이 사용되는 가스켓의 원료이다. 가스켓의 역할은 영구적 지수를 위한 내구성 확보, 내마모성, 복원력 유지, 반복압축에 의한 탄성력 유지, 화학적, 미생물학적 공격에 대한 저항성이다. 일반적으로 6~7 mm에서 압축되고 어느 정도 틈새 간격(gap)이 있는 경우에도 시공이 가능하다. 가스켓의 두께가 수팽창 지수재보다 크기 때문에 시공오차가 클 경우 수팽창 지수재보다는 유리하다고 할 수 있다. 또한 가스켓은 상당한 압축력이 있어야 방수효과가 나타나므로 이렉터의 힘이 충분히 필요하다. 그렇기 때문에 쉴드 TBM 터널의 단면이 소단면일 경우 이렉터의 충분한 힘이 주어지는지가 중요하여 이를 판단하여야 한다. 일반적으로 가스켓은 장기 내구성이 우수하고, 사용되는 고무의 강도가 커서 고수압 작용 및 세그먼트 시공 시 파손될 우려가 적은 대구경 터널에 적합하다고 알려져 있다. 반면에 조립시 모서리 부분에 고무의 집중현상으로 누수가 발생할 수 있고, 시공 시 밀림 현상으로 누수가 발생할 수 있으며 수팽창 지수재에 비해 경제성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

복합형(composite) 가스켓은 수팽창성 복합 고무 지수재와 수팽창성 복합 고무 가스켓의 두 가지로 분류된다. 수팽창성 복합 고무 지수재는 다시 두 가지로 나뉘는데, 하나는 수팽창 지수재 양옆에 비팽창성 고무를 설치한 것이고, 다른 하나는 중심에 비팽창성 고무를 설치하고 그 위로 수팽창 지수재를 덮는 형태의 지수재이다. 수팽창성 복합 고무 가스켓 지수재는 가스켓 지수재에 수팽창 지수재를 결합한 지수재이다. 최근 급곡 구간이 있는 해외 공사현장에서 가장 많이 사용되고 있는 지수재이며, 수팽창 지수재와 가스켓 각각이 가지고 있는 단점을 보완해주는 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 수팽창성 복합 고무 가스켓 지수재를 사용하였다. 수팽창성 복합 고무 지수재는 양옆에 비팽창성 고무를 통해 폭 방향 팽창을 억제하여 압축력과 내구성 이탈 방지 등을 하는 것과 중앙에 비팽창 지수재를 설치하여 수팽창 지수재의 이탈 방지와 중앙부 팽창효과를 높여 주는 형태로 시공오차에 대한

대응성을 높인다. 수팽창성 복합 고무 가스켓은 가스켓 위에 수팽창 지수재를 붙여서 시공오차에 대한 대응성이 더 우수하다. 하지만 역시 충분한 이렉터의 압축력이 필요하므로 소단면보다 대구경의 터널에서 유리할 수 있다.

앵커형 가스켓(anchor type gasket)은 최근 유럽에서 개발된 지수재로 다른 지수재들과 달리 세그먼트를 제작하는 몰드에 미리 설치한 후에 콘크리트를 타설하여 세그먼트와 완전히 일체화 시키는 방법이다. 가스켓의 단점을 보완하는 시공방법으로 가스켓과 세그먼트의 접착불량과 모서리 부분에 고무의 집중현상을 방지할 수 있다. 다만 제작과정에서 정밀한 제작이 필요하고, 세그먼트와 일체화 되어 있기 때문에 야적장에 비가 오면 수팽창 지수재가 팽창할 수 있기 때문에 복합 고무 지수재 사용이 어렵다. 대신 일체화되어 있기 때문에 시공단계에서는 시공을 빠르게 할 수 있는 장점이 있다.

4. 지수재의 특성 및 내수압 실험 장비

본 연구에서는 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 수팽창 지수재와 유럽에서 가장 많이 사용되고 있는 EPDM 가스켓을 사용하여 고수압 조건에서 세그먼트 시공오차에 따른 방수 성능을 각각 평가하였다. 이를 위하여 우선 지수재의 물리적 특성을 지수재 제조사의 협조를 받아 조사하고 방수성능 평가를 위하여 내수압 실험장비를 자체 제작하여 다양한 실험을 수행하였다.

4.1 지수재의 물리적 특성 평가

쉴드 TBM 터널 시공에서 일반적으로 사용되고 있는 수팽창 지수재와 EPDM 가스켓에 대한 물리적 특성을 조사하였다. 국내 KS 및 관련 기업체에서 사용하고 있는 실험 방법 및 판정 기준을 조사하였다. 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 수팽창 지수재의 시험 방법 및 설계기준은 Table 1과 같다. 또한 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 가스켓의 시험 방법 및 설계기준은 Table 2와 같다. 본 연구의 실험에 사용된 수팽창 지수재 및 가스켓은 이와 같은 설계기준을 통과한 제품을 사용하였다.

Table 1. Design code for hydrophilic rubber waterstop

	KS standard	Value
Tensile strength (MPa)	KS M 6518	Over 2.45
Elongation (%)	KS M 6518	Over 500
Hardness (Hs)	KS M 6518	45 ± 5
Expansion ratio (%)	KS M 6518	300~500
		Over 100
Visual inspection	Vernier calipers	Width: 20 mm Flat type: 3.0 mm

Table 2. Design code for gasket

	KS standard	Value
Hardness (Hs)	KS M 6518	75 ± 5
Tensile strength (MPa)	KS M 6518	Over 14.7
Elongation (%)	KS M 6518	Over 350
Weight rate (%)	KS M 6518	Below 2
Ozone resistance	KS M 6518	No crack

4.2 내수압 실험 장비 및 실험 조건

내수압 실험은 지수재 접합부의 내압 성능과 현장 시공 시 조립 정도에 의한(Gap과 Offset에 따른) 내압 성능을 평가하는 것으로 지수재의 방수 성능이 설계 구간의 수압 조건에 타당한가를 평가하는 것이 주목적이다.

내수압 실험 장비는 실험 조건인 틈새 간격과 엇갈림 그리고 수압의 변화를 줄 수 있도록 제작되었고 강재(steel) 재질을 사용하여 수압 20 bar 이상의 내구성을 확보하였다. 구조는 세그먼트에서 가장 누수가 많이 발생하는 구간인 T형 접합부(T-joint)를 모사할 수 있도록 설계하여 실제 현장 시공 시 발생할 수 있는 여러 상황에 대해서 지수재의 내수압 성능을 검증할 수 있도록 하였다.

내수압 실험 조건은 다음과 같이 설정하였다. 틈새 간격과 엇갈림의 전체 조건은 틈새 간격: 0~7 mm, 엇갈림: 0~10 mm으로 설정하였다. 전체 설정 가운데에서, 가스켓의 경우는 틈새 간격은 3 mm, 5 mm, 7 mm 조건으로, 엇갈림은 5 mm, 7 mm, 10 mm 조건을 조합하여 실험을 수행하였다. 수압의 경우 20 bar를 최대 수압으로 적용하여 실험을 실시하였다.

수팽창 지수재와 EPDM 가스켓의 내수압 실험 방법은 다음과 같다. 틈새 간격과 엇갈림을 설정하고 1 bar부터 15분 단위로 1 bar를 올려가며 측정하고 누수가 없을 경우 1 bar씩 올려가면서 최종 20 bar까지 수압을 증가시켰다. 만약, 누수가 있을 경우 실험을 중단하고 누수가 발생한 수압을 기록하였다. 최종 20 bar에서 24시간 동안 누수가 발생하는지 확인하고 실험을 종료하였다. 위와 같은 방식으로 틈새 간격과 엇갈림의 변화를 주어 실험을 반복하여 실시하였다.

5. 수팽창 지수재의 방수 성능 평가

5.1 수팽창 지수재 선정

국내 터널에서 보편적으로 사용하는 수팽창 지수재를 선정하여 실험을 실시하였다. 수팽창 지수재는 Table 3 및 Fig. 4와 같이 폭 20 mm, 높이 4 mm를 선택하여 사용하였다.

Table 3. Dimension of hydrophilic rubber waterstop

Dimension	Model	Width × Height
	DS-4020	20 mm × 4 mm

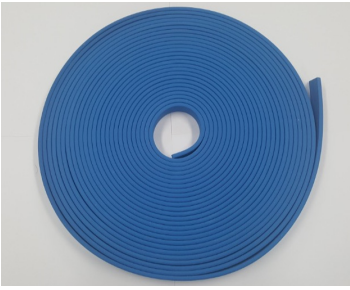


Fig. 4. Hydrophilic rubber

5.2 수팽창 지수재 내수압 실험 장비 및 방법

수팽창 지수재 내수압 실험 장비를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 수팽창 지수재는 가스켓과 비교하여 부착이 용이하므로 라운드 형식이 아닌 직각의 모양으로 설계하였다.

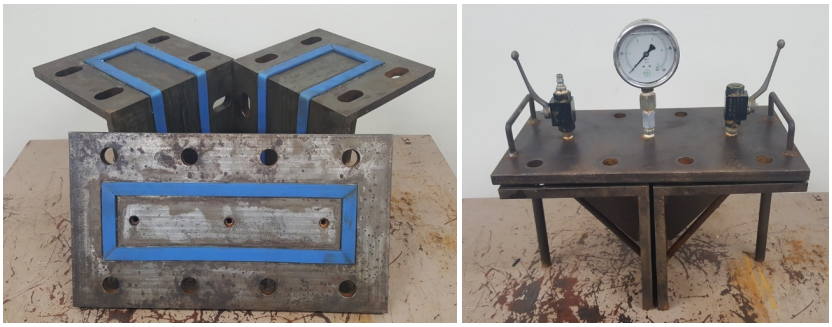


Fig. 5. Test apparatus for hydrophilic rubber waterstop

수팽창 지수재 내수압 실험 방법은 지수재의 두께가 4 mm로 틈새 간격 조건을 크게 주고 실험을 할 수가 없다. 그러므로 틈새 간격을 3 mm부터 1 mm 씩 증가시켜 실험을 실시하였고 엇갈림 조건을 0 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm로 나누어서 실험을 진행하였다. 전술한 바와 같이 수팽창 지수재 실험 방법은 틈새 간격과 엇갈림을 설정하고 1 bar부터 15분 단위로 1 bar씩 올려가며 측정하고, 누수가 없을 경우 1 bar씩 올려가면서 최종 수압 20 bar까

지 실험을 실시하였다. 만약, 누수가 있을 경우 실험을 중단하고 누수가 발생한 수압을 기록하였다. 최종 20 bar에서 24시간 동안 누수가 발생하는지 확인하고 실험을 종료하였다. 위와 같은 방식으로 틈새 간격과 엇갈림의 변화를 주어 실험을 반복하여 실시하였다.

5.3 수팽창 지수재 내수압 실험 결과

수팽창 지수재에 대한 내수압 실험 결과는 다음과 같다.

- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 0 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 5 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 7 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 10 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 4 mm, 엇갈림 0 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 4 mm, 엇갈림 5 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 4 mm, 엇갈림 7 mm의 경우: 실험결과 7 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 8 bar일 때 T형 접합부와 직선부에서 각각 Fig. 6과 Fig. 7에서와 같이 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 4 mm, 엇갈림 10 mm의 경우: 실험결과 6 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 7 bar일 때 T형 접합부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 5 mm, 엇갈림 0 mm의 경우: 실험결과 T형 접합부에서 두께 부족으로 인하여 완전한 압착이 이루어지지 않아 1 bar에서 누수가 발생하였다.

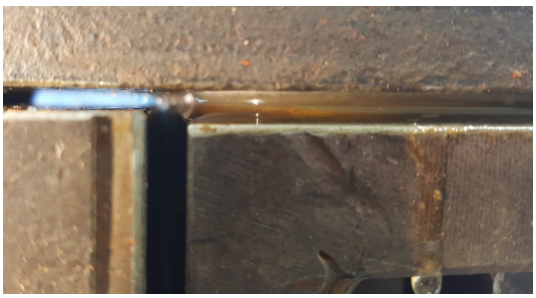


Fig. 6. Leakage at T-joint

Fig. 7. Leakage at straight line

5.4 수팽창 지수재 내수압 실험 결과 분석

수팽창 지수재 실험결과는 전체적으로 Table 4와 같다. 여기에서 주어진 수압 조건에서 누수가 발생하지 않으면 P, 누수가 발생하여 실험을 중단한 경우 F로 표기하였다. 수팽창 지수재의 경우 시공오차가 작은 조건에서는 우

수한 방수 성능을 보였지만 틈새 간격(gap)이 커짐에 따라 방수성능이 현저하게 떨어지는 결과를 얻을 수 있었다. Table 4에서 보는 바와 같이 틈새간격이 4 mm만 되어도 엇갈림이 7 mm부터는 지수재 역할을 수행할 수 없다고 판단되고, 또한 틈새간격이 5 mm가 되면 엇갈림이 없어도 방수 기능을 수행하지 못함을 알 수 있다. 수팽창 지수재는 팽창압을 통해 방수하는 원리이기 때문에 단기간의 내수압 실험에서 정확한 방수 성능을 검증하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 내수압 실험 조건에서 내수압 장비를 조립 후 수팽창 지수재를 팽창시키기 위해 5일간 침수 시키고 팽창 실험을 진행하였지만, 결과는 큰 차이가 없었다. 또한, 조립하지 않고 침수를 시켜 실험을 진행하였지만, 과팽창으로 인하여 수팽창 지수재가 이탈하여 실험을 진행할 수 없었다. 수팽창 지수재는 대부분의 누수가 T형 접합부 부분에서 누수가 발생하였는데 모서리 부분에서 곡선 형태로 접착되어서 누수에 취약한 것으로 판단된다. 실험결과, 엇갈림(offset)에 대한 대응성은 우수하나 틈새 간격(gap)에 대한 대응성이 현저히 떨어지고, 따라서 틈새 간격이 4 mm 이하의 조건으로 시공이 가능할 경우에만 사용되는 것이 합당할 것으로 판단된다.

Table 4. Summary of waterproof tests for hydrophilic rubber waterstop

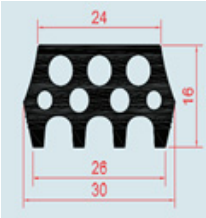
Test condition \ Water presure (bar)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gap: 3 mm, Offset: 0 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 3 mm, Offset: 5 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 3 mm, Offset: 7 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 3 mm, Offset: 10 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 4 mm, Offset: 0 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 4 mm, Offset: 5 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 4 mm, Offset: 7 mm	P	P	P	P	P	P	P	F												
Gap: 4 mm, Offset: 10 mm	P	P	P	P	P	P	F													
Gap: 5 mm, Offset: 0 mm	F																			

6. 가스켓 지수재의 방수 성능 평가

6.1 가스켓 선정

국내 터널에서 보편적으로 사용하는 가스켓 지수재를 선정하여 실험을 실시하였다. 가스켓은 Table 5와 같이 높이 16 mm, 너비 26 mm의 복합형(composite type) 가스켓(gasket)을 선택하여 사용하였다. 실험을 실시하기 위해 Fig. 8과 같이 양면 가스켓을 제작하여 사용하였다. 본 논문에서는 실제로 고수압하에서 가스켓을 적용한다면 복합형 가스켓이 적용될 것이라는 가정 하에 복합형 가스켓을 사용하였다. 따라서 순수 가스켓과는 성능면에서 차이가 있을 수 있다.

Table 5. Dimension of EPDM gasket

Dimension	Model	Width × Height
	Composite type	26 mm × 16 mm

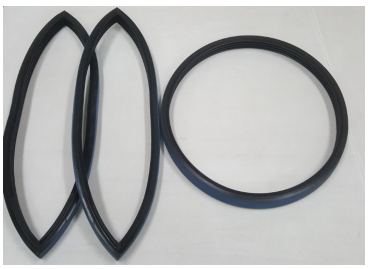


Fig. 8. EPDM gasket

6.2 가스켓 내수압 실험 장비 및 방법

가스켓 내수압 시험을 위하여 제작한 장비는 Fig. 9와 같다. 실험장비 제작 시에 가장 중심을 두었던 것은, EPDM 가스켓과 세그먼트 그루브(groove)의 체적 설정이다. EPDM 가스켓 체적은 세그먼트 그루브(groove)와 비교하여 약 90~95%를 유지해야 효과적인 방수를 기대할 수 있다. 만약 가스켓이 그루브 체적보다 클 경우 세그먼트 조립 시 가스켓이 들뜨는 현상이 발생할 수 있고, 가스켓의 과도한 압축으로 인한 탄성 반발력 저하로 장기적으로 누수 가능성의 증가를 초래한다. 그리고 세그먼트 조립 시 틈새 간격을 발생 시킬 수 있다. 따라서 내수압 장비의 그루브(groove) 설계 시 체적을 고려하여 제작하였다.

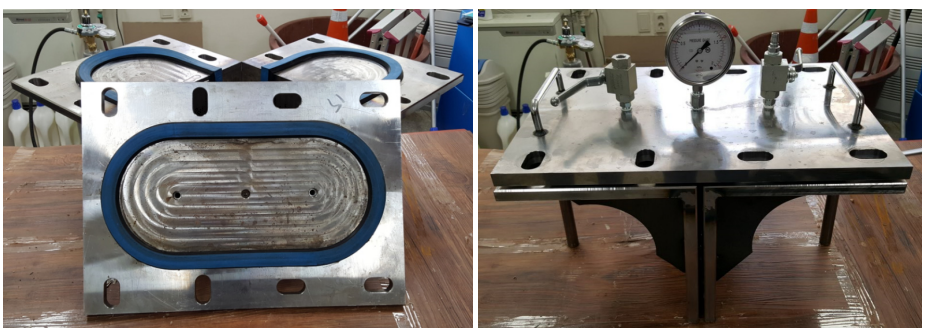


Fig. 9. Test apparatus for gasket

가스켓 내수압 실험은 틈새 간격 3 mm, 5 mm, 7 mm이고 엇갈림은 5 mm, 7 mm, 10 mm로 설정하여 실험을 진행하였다. 수압은 수팽창 지수재와 동일하게 최대 20 bar로 설정하였다.

6.3 가스켓 내수압 실험 결과

가스켓 지수재에 대한 내수압 실험 결과는 다음과 같다.

- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 5 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 7 mm의 경우: 실험결과 15 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 16 bar일 때 T형 접합부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 3 mm, 엇갈림 10 mm의 경우: 실험결과 13 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 14 bar일 때 T형 접합부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 5 mm, 엇갈림 5 mm의 경우: 실험결과 20 bar까지 누수가 발생하지 않았다.
- 틈새 간격 5 mm, 엇갈림 7 mm의 경우: 실험결과 14 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 15 bar일 때 T형 접합부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 5 mm, 엇갈림 10 mm의 경우: 실험결과 12 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 13 bar일 때 라운드 부분 중간에서 누수가 먼저 발생하였다.
- 틈새 간격 7 mm, 엇갈림 5 mm의 경우: 실험결과 18 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 19 bar일 때 라운드 부분과 직선부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 7 mm, 엇갈림 7 mm의 경우: 실험결과 13 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 14 bar일 때 T형 접합부에서 누수가 발생하였다.
- 틈새 간격 7 mm, 엇갈림 10 mm의 경우: 실험결과 10 bar까지는 누수가 발생하지 않았으나, 수압이 11 bar일 때 우선 하부에서 누수가 발생하고 점차 전체적으로 누수가 발생하였다.

6.4 가스켓 내수압 실험 결과 분석

가스켓 실험결과는 전체적으로 Table 6과 같다. 여기에서 주어진 수압 조건에서 누수가 발생하지 않으면 P, 누수가 발생하여 실험을 중단한 경우 F로 표기하였다. 가스켓은 누수가 하부와 라운드 부분에서 많이 발생하였고 내수압 장비가 라운드 곡선의 형태를 가지므로 직선부분보다 누수에 취약하여 가장 먼저 누수가 발생했다. Fig. 10 및 Fig. 11은 실험결과를 틈새 간격과 엇갈림에 대하여 각각 그래프로 나타냈다. 즉, 각각의 틈새 간격 및 엇갈림 조건에서 누수가 일어나지 않는 즉, 방수할 수 있는 최대 수압을 나타내고 있다. 가스켓은 수팽창 지수재에 비해 두께가 두꺼우나 엇갈림으로 인한 편심의 발생으로 밑 부분이 들뜨는 현상과 가스켓 구조상 밑 부분에 공간이 있어서 틈으로 물이 들어가면 수압이 압축력과 반대로 작용하기 때문에 누수에 취약해진다. 가스켓은 틈새 간격

(gap)에 대한 대응성은 우수하나 엇갈림(offset)에 대한 대응성은 상대적으로 취약한 것으로 나타났다. 가스켓은 엇갈림이 5 mm가 넘어가면 누수에 취약해지는 것으로 나타났기 때문에 시공단계에서 엇갈림을 제어할 수 있는 현장에서 엇갈림이 5 mm 이하인 조건에서 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

Table 6. Summary of waterproof tests for gasket

Water pressure (bar) / Test condition	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Gap: 3 mm, Offset: 5 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 3 mm, Offset: 7 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F				
Gap: 3 mm, Offset: 10 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F						
Gap: 5 mm, Offset: 5 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Gap: 5 mm, Offset: 7 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F					
Gap: 5 mm, Offset: 10 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F							
Gap: 7 mm, Offset: 5 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	
Gap: 7 mm, Offset: 7 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F						
Gap: 7 mm, Offset: 10 mm	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F									

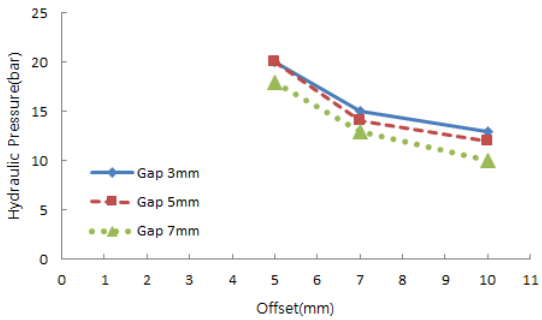


Fig. 10. Waterproofing of gasket according to offset

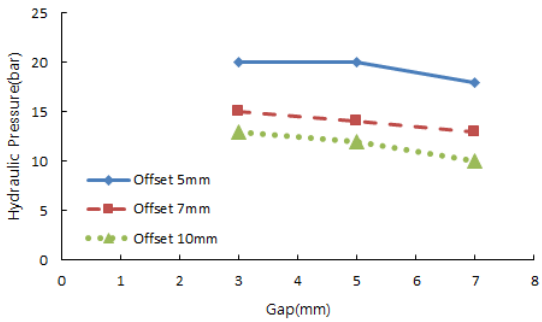


Fig. 11. Waterproofing of gasket according to gap

7. 결 론

본 연구에서는 쉴드 TBM 터널의 누수원인을 조사 분석하고, 이를 토대로 다양한 세그먼트 시공 오차에 따른 수팽창 지수재 및 가스켓 각각에 대한 방수성능을 평가하여 그 적용성을 검토하였다. 수팽창 지수재의 경우, 틈새 간격을 3 mm부터 1 mm 씩 증가시켜 실험을 수행하였고, 엇갈림 조건을 0 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm로 나누어서 실험을 실시하였다. 가스켓의 경우, 복합형(composite type) 가스켓을 선정하여 틈새 간격 3 mm, 5 mm, 7 mm이고 엇갈림은 5 mm, 7 mm, 10 mm로 설정하여 실험을 수행하였다. 가해진 수압은 20 bar를 최대 수압으로 적용하여 실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 해외 현장의 실제 누수 데이터를 통하여 누수원인을 분석하여 본 결과, 세그먼트 이음부 누수가 가장 큰 원인으로 나타났고, 다음으로 그라우트 주입구, 볼트 체결부, 크랙으로 인한 세그먼트 누수 순으로 나타났다.
2. 국내의 경우, 이음부와 볼트부, 및 뒤채움 주입공에서 누수가 가장 많이 발생하는 것으로 조사되었다. 누수는 수팽창 지수재의 두께 부족, 팽창 성능 저하, 지수재의 손상, 시공오차로 인한 지수재 방수성능 저하, 세그먼트 균열, 볼트 풀림현상으로 인한 볼트부 누수, 뒤채움재의 불균일한 충전 등의 원인으로 나타났다.
3. 수팽창 지수재의 내수압 실험결과로는 지수재 두께가 두껍지 않아 틈새 간격(gap)에 대한 대응성이 매우 약하고 미세한 틈에서의 팽창성이 불확실하게 나타났고, 두께만 팽창하는 것이 아닌 폭 방향, 길이방향의 팽창으로 틈새 간격(gap)이 클 경우 지수재의 이탈이 발생하는 것으로 나타났다. 내수압 실험결과, 수팽창 지수재는 틈새 간격 4 mm 이하의 조건에서 방수성능이 우수하였고, 따라서 틈새 간격의 시공 오차가 작은 현장에만 적용할 것을 권장한다.
4. 가스켓의 내수압 실험결과로는 수팽창 지수재보다 두께가 큰 가스켓은 틈새 간격(gap)에 대한 대응성은 우수하나, 엇갈림(offset)에 대한 대응성은 상대적으로 저하되는 것으로 나타났다. 엇갈림으로 인한 접촉면 감소, 편심 발생으로 가스켓의 밑부분 들뜸 현상으로 인한 물의 침투로 수압이 밑에서 작용하여 방수 성능 저하가 급격히 발생하는 것으로 나타났다. 현재의 가스켓 설치방법은 엇갈림이 5 mm 이하에서 방수성능이 우수하였고 엇갈림 제어가 가능한 현장에 적용할 것을 권장한다.
5. 본 연구결과는 연구에 사용된 수팽창 지수재와 가스켓에 대한 제한된 실험조건 및 장비에 대하여 수행된 결과이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면(φ3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(18SCIP-B105148-04)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Choi, W.Y., Lee, H.P., Jun, G.C., Lee, S.W. (2014), “Evaluation of waterproof and durability of hydrophilic waterstop”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 2, pp. 117-124.
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”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 6, pp. 667-681.
3. Kim, S.H., Kim, W.K., Lee, H.Y. (2013), “Effect of segment thickness during shield TBM tunnelling in case study”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 311-320.
4. 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”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 1, pp. 13-25.
5. Korea Infrastructure Safety Corporation (2013), Development of performance evaluation standard and maintenance manual of special excavation tunnel (shield tunnel).
6. Lee, S.W., Jeoung, J.H., Hwang, J.H. (2009), “Evaluation of hydrophilic waterstop for shield TBM tunnel under high water pressure”, Proceedings of the Korean Geo-Environmental Conference 2009, Seoul, Korea, pp. 389-392.