Technical Note

하수터널의 콘크리트 라이닝 부식 방지공법 선정방법에 관한 고찰

문준식^{1*} · 이성준²

¹정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 조교수

²비회원, 청주대학교 이공대학 토목공학과 조교수

Selection of concrete lining corrosion protection method for large sewer tunnels

Joon-Shik Moon^{1*}, Sungjune Lee²

¹Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University

²Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Cheongju University

ABSTRACT: Recently construction of large sewer tunnels used also as underground sluiceways/storages is increasing in order to prevent urban inundation, untreated sewage flow into rivers from combined sewer overflows and consequential river pollution due to climate change. Most of these large sewer tunnels are constructed with concrete and the concrete lining should be protected from corrosion caused by hydrogen sulfide(H_2S). This paper introduced popular concrete corrosion protection methods for large sewer tunnels with 100-plus years of life cycle, and pros and cons of each corrosion protection methods were described by giving specific examples. However, it is difficult to objectively assess corrosion protection alternatives because of insufficient track record of corrosion protection methods applied to large sewer tunnels. In this paper, the evaluation process for selecting a corrosion protection alternative was introduced for large sewer tunnels using a case study.

Keywords: Large sewer tunnel, Hydrogen sulfide, Concrete lining corrosion, Concrete corrosion protection

초 록: 최근 기후변화로 인한 도시침수와 합류식 하수관거 월류수 (combined sewer overflow)로부터 처리되지 않은 하수의 하천유입, 그리고 그에 따른 하천의 오염의 방지를 위해 지하방수로/저류조 겸용의 대형 하수터널의 건설이 증가하고 있다. 이러한 대형 하수터널의 경우 대부분 콘크리트 라이닝을 적용하고 있지만 하수관거 내에서 발생하는 황화수소(H_2S)로 인하여 콘크리트가 부식될 수 있으므로 이에 대한 적절한 보호공이 필요하다. 본 논문에서는 최소 100년의 수명을 고려하여 설계된 대형 하수터널의 콘크리트 라이닝 부식을 방지하기 위해 여러 공법들을 소개하고 각 공법의 일반적인 장단점과 설계 사례를 설명하였다. 하지만 대형 하수터널 라이닝의 부식방지 공법들의 적용 실적이 부족하여 부식방지 공법을 적용한 터널설계 대안에 대한 객관적인 평가가 쉽지 않다. 따라서 본 논문은 설계 사례연구를 통해 콘크리트 라이닝 부식방지 공법선정 프로세스를 소개하였다.

주요어: 대형 하수터널, 황화수소, 콘크리트 라이닝 부식, 콘크리트 방식 공법

1. 서 론

최근 기후변화 등으로 인한 도심지 침수가 빈번하게 발생함에 따라 지하 방수로/저류조 역할을 겸할

수 있는 콘크리트 대형 하수 터널 건설이 많아지고 있다. 하지만 하수관거 내에서 발생하는 황화수소(H_2S)로 인하여 콘크리트가 부식될 수 있으므로 이에 대한 적절한 보호공이 필요하다. 미국의 경우 최근 20-30년 전부터 환경적인 규제로 중금속의 하수관로의 유입이 줄었으나, 박테리아 번식을 억제한 중금속의 감소로 관내 황화수소 농도는 급격히 늘게 되었

*Corresponding author: Joon-Shik Moon
E-mail: j.moon@knu.ac.kr

Received May 22, 2014; Revised June 19, 2014;
Accepted June 27, 2014

고 콘크리트 하수관거의 부식이 심각하게 증가하는 현상이 발생하여 대대적인 보수가 요구되었다(Uhren and Gilbert, 2001). 이러한 조사결과를 바탕으로 최근 건설되는 대형 하수 콘크리트 터널은 PVC 또는 HDPE 슬립라이너(slip liner), 코팅, 환기 등의 방법을 통해 황화수소로 인한 콘크리트 표면의 부식을 최소화하여 터널의 구조적 안정성을 높이고 장기 유지보수 비용을 줄이도록 하고 있다.

본 논문에서는 대형 콘크리트 하수관거에서의 부식 문제에 대해 살펴보고 여러 콘크리트 부식방지 공법의 장단점을 비교하였다. 이러한 조사결과를 바탕으로 콘크리트 부식방지 공법 설계 시 고려해야 할 사항과 리스크를 검토하고 사례연구를 통해 대형 콘크리트 하수터널의 부식방지 공법의 대안선정 프로세스를 소개하도록 한다.

2. 콘크리트 하수터널의 부식 메커니즘

과거 하수관거 시스템에서는 주로 맨홀이나 배수조, 낙하갱(drop shaft)과 같이 황화수소가 많이 발생하는 조건에서 콘크리트의 부식문제가 심각하게 발생하여 이에 대한 보수보강이 많이 이루어졌다. 콘크리트 하수관 자체의 부식은 주로 기온이 높은 지역에서

발생하는 것으로 알려져 그와 관련된 연구가 수행되었으나, 최근 지하 방수로/저류조 겸용목적의 대형 하수터널의 설계가 증가하면서 100년 이상 수준의 설계연한에 대한 대책으로 콘크리트 터널 벽면에 부식방지공법을 적용하고 있다. 특히 대형 하수터널의 경우 일반적으로 건기 중 관내 유속이 느려 관내 체류시간(detention time)이 길어 황화수소(H_2S)가 생성되고 터널 벽면이 부식되기 쉬운 환경이 조성된다.

관내 유속이 느려 하수의 관내 체류시간(detention time)이 길어지게 되면 박테리아 슬라임 층(bacterial slime layer)이 형성되고, 이 슬라임 층 내 환원성 박테리아에 의해 유화물이 분해되어 황화수소(H_2S)가 생성되게 된다(Fig. 1). 황화수소는 공기 중 산소와 결합하여 식 (1), (2)의 화학작용으로 황산(H_2SO_4)이 생성되어 콘크리트 하수터널 벽면을 부식시키게 된다.

황산이 생성되는 과정에서 황화수소를 산화시키는 유황세균(Sulfur Bacteria, Thiobacillus)이 생존·번식할 수 있는 환경이 조성되기 위해서 2~5 ppm의 황화

Fig. 1. Diagrammatic Representation of Sulphuric Acid Attack (Tuxworth et al, 2007)

수소 가스가 하수도 터널 안에 유지되어야 한다. 미국의 3 m 직경의 하수관 내 황화수소 농도를 측정한 결과 150~200 ppm 이상으로 측정되기도 하였으며 (Uhren and Gilbert, 2001), 하수터널 내부 표면에서는 pH값이 0.5까지 측정되었다(Chapman and Frank, 2005).

3. 콘크리트 하수터널 부식방지 공법의 종류

최근 지하 방수로/저류조 겸용을 목적으로 휴관과 같은 부식에 대한 저항력이 높은 프리캐스트 파이프 최대직경 이상의 대형 하수터널이 도입되면서 현장타설 콘크리트나 세그먼트 콘크리트 라이닝의 부식방지 공법이 적용되고 있다. 황화수소로 인한 하수관거 콘크리트 부식을 방지하는 공법으로는 콘크리트 표면에 PVC 또는 HDPE 시트를 부착시키는 슬립라이닝 공법, 폴리우레탄이나 에폭시 등을 콘크리트 표면에 도포하는 코팅공법, 황화수소에 대한 내구성이 큰 특수 콘크리트를 사용하는 방법, 환기시스템 운영을 통한 터널 내 황화수소 농도 감소 방법, 화학약품 주입을 통한 황화수소 발생 최소화 방법 등이 있다.

3.1 Thermoplastic Lining

Thermoplastic 라이닝은 최근 대형 하수터널 시공

Fig. 3. Joint Strip Attachment

시 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. 콘크리트 라이닝에 PVC나 HDPE 시트를 부착하여 콘크리트 표면이 황화수소에 직접적으로 노출되는 것을 막아 콘크리트 부식을 방지하는 가장 직접적이고 효과적인 방법이다. 열가소성(Thermoplastic) 시트를 부착시기에 따라 콘크리트 세그먼트 제작 시 시트를 부착한 후 세그먼트 조립하는 방법(one-pass, Fig. 2)과 2차 라이닝 타설 중 또는 세그먼트 조립 후 시트를 부착하는 방법(two-pass)이 있다. 전자의 방법은 공장에서 세그먼트에 시트를 부착하므로 품질관리가 가능하고 원패스(one-pass) 시공으로 공기단축이 가능하다. 하지만, 시트가 시공 중 그대로 노출되어 있어 세그먼트 운반, 적재, 조립, 굴착 작업 중 손상이 될 우려가 높고 모든 세그먼트 조인트에서 Fig. 3과 같이 strip을 이용한

Fig. 2. One-Pass Corrosion Protection Using Thermoplastic Liner

접합을 수행해야 하는 단점이 있다. 이 방법은 미국 세크라멘토에 있는 Upper Northwest Interceptor 터널 프로젝트(2007-2010년)에서 처음 적용되었으며 성공적으로 수행되었다. 세그먼트에 부착되는 PVC, HDPE 시트에는 Fig. 4와 같이 앵커체가 부착되어 있는 제품(Anchored Sheet Liner)이 주로 사용된다.

투패스(Two-pass) 방법은 세그먼트 조립 후 PVC 또는 HDPE 시트를 콘크리트나 에폭시 등을 이용하여 터널 상부 270~330°에 부착하는 방법이다. 시트를 부착하는 방법에 따라 Fig. 4와 같은 앵커식 시트 라이닝(Anchored Sheet Liner)을 2차 콘크리트 라이닝과 함께 부착하는 방법(Fig. 5)과 세그먼트 조립 후 콘크리트 표면에 에폭시 등을 도포하여 Liner 시트를 부착하는 방법(Chemically Attached Liner)이 있다. Anchored sheet liner를 부착하는 방법은 라이닝 시트의 횡방향 조인트만 스트립 접합이 필요하므로 공정은 단순하지만 2차 라이닝 콘크리트를 타설하여 부착하므로 추가공기가 필요하고 굴착단면이 커지는 단점이 있다. 이 방법은 1990년대 후반 싱가포르 DTSS (Deep Tunnel Sewerage System, 내경 3.3~6.0 m)의 약 48km 콘크리트 세그먼트 라이닝 구간에서 성공적으로 적용되었고, 현재 아부다비 DTS (Deep Tunnel Sewer, 내경 4.0 m) 42 km 터널공사에서 적용 중이며, 건설 예정인 영국 Thames Tideway Tunnel 프로젝트에서도 앵커형 라이너를 이용한 2차 라이닝을 적용하

Fig. 5. Two-Pass Corrosion Protection Using Thermoplastic Liner

고 있다. 싱가포르 DTSS의 경우 두께 23 cm (9 inch) 이상, 아부다비 DTS의 경우 두께 25 cm 이상의 무근 콘크리트와 함께 라이너를 부착하도록 규정하여 약 45~50 cm의 외경 증가가 필요하였다.

화학적 접합 라이너(Chemically Attached Liner)는 콘크리트 표면에 에폭시를 도포하여 Fig. 4와 같은 앵커형 라이너를 부착하거나, 친수성 프라이머를 콘크리트 표면에 칠한 후 폴리우레탄을 콘크리트에 도포하여 앵커가 없는 시트를 그대로 부착한다. 이 방법은 에폭시나 폴리우레탄으로 접착을 하게 되므로 상대적으로 두께가 얇아 굴착단면을 줄일 수 있고 콘크리트 라이닝 폼이 필요없어 공정이 빠르고 단순한 장점이 있다. 하지만 에폭시나 폴리우레탄의 도포는

Fig. 4. Anchored Sheet Liner

쉽게 핀홀 등이 발생하는 경우가 많고 워터 포켓 발생 시 접착력만으로 수압에 저항하기 어려워 포켓의 크기가 시간에 따라 커질 가능성이 있으며 시트 부착은 품질을 위해 수작업으로 수행하도록 권고하고 있어 장대터널의 본선에 적용하기에는 어려움이 있다. 이 방법은 주로 하수처리장과 일부 하수관 보수공사에 사용되었다. 최근 미국 오하이오주의 내경 4.5 m 내외의 신축 하수터널에 적용되었으나 폴리우레탄 도포가 일정하게 이루어지지 않고 기계를 이용하여 자동으로 시트를 부착하면서 도포상태가 확인되지 않았다. 결과적으로 Fig. 6과 같이 특정 시트 부착 시 세그먼트 조인트 부분(특히 횡방향 조인트)과 그라우트 홀이 폴리우레탄으로 충분히 채워지지 않아 다수의 에어

포켓과 워터 포켓이 발생하였고 시간이 지남에 따라 포켓의 크기와 숫자가 증가하여 보수에 큰 어려움을 겪었다(Fig. 7).

3.2 특수 고강도 콘크리트

특수 고강도 콘크리트는 부식에 대해 민감한 것으로 알려진 콘크리트 내 알루미늄산칼슘(Calcium Aluminate)의량을 줄이고 동시에 투수계수를 감소시킴으로서 황산의 침투에 대한 저항력을 높이는 방법이다. 콘크리트의 초기 pH는 약 12~13정도 되는데 이는 유황세균(Sulfur Bacteria)에 충분히 저항할 수 있는 수준이지만, 시간에 따라 pH가 9이하로 떨어지게 되면 콘크

Fig. 6. PVC Sheet Installation Leading to Defects

Fig. 7. Total Defects (Air Pockets & Water Pockets) per PVC Sheet Installed

Fig. 8. Polymer Concrete Pipe (Maguire & Iskander, 2008)

리트 표면에서 박테리아가 번식하기 시작하고 점차 pH가 감소하여 거의 0 정도로 떨어질 때까지 박테리아의 번식이 계속된다. 실험에 의하면 일반 포틀랜드 시멘트(Type II)의 경우 pH 6 정도 수준에서 콘크리트 표면에 부식이 일어나기 시작하였지만, 콘크리트 믹스에 약 7%의 실리카 흙(Silica Fume)을 첨가하였을 경우에는 pH 4.5 수준에서 부식이 일어나기 시작하였다(OCTC Report, 2008).

미국 오하이오주에 있는 직경 2.5 m의 OSIS 하수터널의 경우 1934년에 건설되어 약 75년간 사용되었다. 터널 내 황화수소 농도는 약 20~30 ppm으로, 황화수소를 산화시키는 유황세균(Sulfur Bacteria, Thiobacillus)이 생존·번식할 수 있는 환경이 조성되기 위한 농도인

2~5 ppm의 6~10배 수준으로 측정되었다. 하지만, 하수터널 탐상로봇을 이용해 촬영한 비디오를 확인한 결과 콘크리트 표면의 부식 정도는 무시할만한 수준인 것으로 파악되었다. 이는 터널이 실리카 흙을 첨가한 고강도 콘크리트 라이닝으로 시공되기 때문으로 판단하였다. 이를 근거로 2000년대 초반에 건설된 미국 오하이오주 BWARI Part I 하수터널의 경우, 잠재적인 콘크리트 부식 가능성을 최소화하기 위해 5~7%의 실리카 흙을 첨가한 압축강도(재령 28일) 41.4 MPa (6,000 psi) 이상의 고강도 콘크리트 세그먼트를 사용하도록 시방서에 규정하였으며, 현장타설 콘크리트 배합 시에는 염화칼슘을 완전히 제거하고 염화이온의 함량을 0.15%(시멘트 무게대비) 이하로 규정하였다.

산에 대해 높은 저항력을 보이는 폴리머 콘크리트(Polymer Concrete)를 이용한 레진 파이프나 폴리머 콘크리트 세그먼트도 고려할 수 있다. 폴리머 콘크리트 파이프(Fig. 8)는 현재 최대 직경 2.5 m 수준으로 제작되며 맨홀, 파이프 재킹이나 세미샐드 공법을 통해 많이 사용되었으며 30년 이상의 적용 실적이 있다. 미국 오하이오 BWARI 프로젝트와 세크라멘토 Upper Northwest Interceptor 프로젝트는 폴리머 콘크리트 세그먼트 사용 시 레진을 7% 이상 사용하도록 규정하였다. 폴리머 콘크리트는 산에 대해서는 높은 저항력

Fig. 9. Long-term Rupture Strength of Polymer Concrete Pipe for pH 1 Acid Solution

Fig. 10. Polymer Concrete Segment

과 높은 강도를 보이지만, 최소 100년의 수명을 고려하여 설계되는 터널을 고려하였을 때 생물학적 침투에 대한 저항력, 크리프 장기변형 가능성, 시간에 따른 강도저하(Fig. 9)에 대해서는 장기간에 걸친 시험이 수행되어 확인되지 않은 단점이 있다.

철근을 배근한 폴리머 콘크리트 세그먼트(Fig. 10)의 사용은 여러 하수도 프로젝트에서 논의는 되었으나 시험시공 외에는 아직까지 적용사례는 보고 되지 않았다. 폴리머 콘크리트 세그먼트 적용 시 일반 콘크리트 세그먼트에 비해 두께가 얇아질 수 있고 추가적인 부식 방지공이 필요하지 않으므로 터널 굴착량이 감소할 수 있으며 one-pass가 가능하여 공기를 단축할 수 있다. 또한 세그먼트 두께와 사용 철근량이 적어 무게가 상대적으로 가벼워 운반 및 조립 시 유리하다. 하지만 일반 콘크리트 세그먼트에 비해 폴리머 콘크리트 세그먼트의 가격이 약 3~4배정도 비싸고 장기거동에 대한 불확실성, 현장 적용 실적이 없어 대형 하수터널에 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

3.3 코팅제 도포

코팅제를 이용한 콘크리트 부식방지 공법은 에폭시(Epoxy), 폴리우레탄(Polyurethane), 폴리우레아(Polyurea) 등의 코팅제를 콘크리트 면에 도포하여 황화수소의 직접적인 접촉을 방지하여 콘크리트 표면의

부식을 방지하는 공법이다. 코팅은 열가소성 라이너(Thermoplastic Liner)와는 다르게 연결부위가 없이 연속적이며 다양한 단면에서 적용이 쉽다. 코팅제를 이용한 방법은 과거 하수터널에 주로 사용되어왔던 공법으로 숙련공이 많고 쉽게 적용이 가능하며 초기 비용이 낮은 장점이 있다. 하지만 코팅에 의한 콘크리트 부식방지 공법은 일반적으로 10~20년 내외의 수명을 가지므로 100년 내구연한을 고려할 때 최소 5번의 재 코팅이 필요하여 결과적으로 다른 방법에 비해 생애주기비용이 더 높으므로 코팅의 상태를 정기적으로 파악하기 용이하고 유지보수를 위해 접근이 쉽고 복잡한 단면으로 열가소성 라이너의 적용이 어려운 맨홀, drop shaft, 하수처리장 등에 적용하기 유리하다. 최근에 건설되고 있는 단면이 일정한 대형 하수터널

Fig. 11. Urethane coating failure after two years (Redner et al., 2004)

본선의 경우에는 코팅보다는 품질과 내구연한의 문제로 열가소성 라이너가 주로 사용되고 있다.

코팅은 상대적으로 표면이 매끄러운 고강도 콘크리트 표면이나 콘크리트 표면이 젖어있는 경우 접착력이 떨어지고 습도변화에 따라 품질이 급격히 저하되는 경향을 보인다(Fig. 11). 또한, 품질관리에 신중을 기한다 하더라도 황산의 침투경로가 될 수 있는 핀홀이 발생하는 경우가 많아 반드시 홀리데이 시험이나 스파크 시험을 실시하여 시공 후 반드시 품질검사를 실시하여야 한다.

코팅 방법과 유사하게 실리카 흙이나 칼슘 알루미늄 네이트를 혼합한 숏크리트를 세그먼트 라이닝 등에 5~15cm 두께로 뿜어붙여 부식을 방지하기도 한다. 이 방법은 코팅과 마찬가지로 적용이 간편하고 코팅제와는 달리 콘크리트 표면이 약간 젖어 있는 상태에서라도 적용이 가능하며 일부 강도증진효과도 있는 장점이 있다. 하지만 실리카 흙 콘크리트나 칼슘 알루미늄 네이트 콘크리트가 부식에 완전히 안전한 것은 아니며 콘크리트 믹스에 약 7%의 실리카 흙(Silica Fume)을 첨가하였을 경우에는 pH 4.5 수준에서 부식이 발생하기 시작하므로 높은 황화수소 농도가 예상되는 하수터널에서는 사용에 제한을 받는다. 표면을 매끈한 세그먼트에 적용하기 위해서는 뿜어붙이기 전 표면을 거칠게 만들거나 프라이머를 먼저 도포해야 한다. 또한 숏크리트 적용 시 표면 조도(거칠기)가 높아져 흐름에 영향을 주게 되므로 터널설계 시 이를 고려해야 한다.

3.4 환기

황화수소는 하수터널에서 가장 주요한 악취물질이며 1ppm의 농도수준에서도 쉽게 검출된다. 환기를 통한 방법은 외부로부터 공기를 터널 내로 주입하여 강제로 흐르게 하여 황화수소를 포함하여 메르캅탄(Mercaptan), L사슬 방향족(light chain aromatic) 등 기타 주요 악취물질을 필터로 이송하는 것이다. 하수터널 내 악취제거를 위한 환기는 황화수소 농도를 일정수준 감소시켜주는 하지만 환기만으로 콘크리트의 부식을 방지시켜주지는 못한다(Nixon, 2006). 환기방식은 신선한 공기의 주입과 오염된 공기의 배출을 통해 터널 내 공기흐름을 일으켜 악취물질과 함께 황화수소 수준을 낮춰주지만 콘크리트 표면에 붙어있는 습기로 인해 일정량의 황화수소는 흡착·용해되어 산화가 발생하며 콘크리트의 부식은 계속 진행되게 된다(Fig. 12).

펌프 스테이션과 interconnector 등에서는 난류의 발생과 복잡한 구조로 인해 공기의 흐름이 원활히 이루어지지 않으므로 더욱 많은 양의 황화수소가 젖은 콘크리트 표면에 흡착되게 되고 부식이 많이 발생하게 되며, 특히 코너부와 같은 사공간에서 장기간 동안 황화수소가 지속적으로 흡착되어 부식 정도가 크게 나타나게 된다. 또한 신선한 공기가 주입되는 수직구에서는 산소가 지속적으로 공급되어 오히려 호기성 박테리아가 번식하기 좋은 환경이 만들어지게 되므로 환기가 콘크리트 부식방지에 악영향을 미칠

Fig. 12. H₂S Being Pulled Across Wetted Surfaces (Nixon, 2006)

수 있다.

일반적으로 약취제와 황화수소 농도감소를 목적으로 하는 환기계획은 터널 내 공기 흐름량을 시간대 별로 변화시키는 것이 아니라, 시공 중 연결되는 기존 터널과 향후 시공되어 연결될 터널 내 공기 흐름량을 모두 고려하여 상황별(상시/비상시) 터널 운영계획에 따라 설계된다. 저류조 겸용 하수터널의 경우는 크게 상시, 비상시(연결터널 유지보수 등), 그리고 홍수시로 나눠 운영계획을 수립하게 된다.

3.5 기타공법

위에서 언급된 공법 외에 기존 하수관거의 보수·보강용으로 사용되는 파이프 라이닝 공법, 하수의 화학적 처리법, 희생용 콘크리트 라이닝 공법, 복합단면 콘크리트 세그먼트 공법 등이 적용될 수 있다.

파이프 라이닝 공법은 슬립 라이닝 공법과 변형관 공법이 있다. 슬립 라이닝 공법은 1차 라이닝이 시공된 터널 내부에 황화수소에 대한 내구성이 큰 대형 복합 재료 파이프를 굴착완료 된 터널 내 거치시키고 주변을 그라우팅 하는 방법이다. 슬립 라이닝 공법은 섬유 보강 폴리머 파이프, 유리섬유 보강콘크리트 파이프, PVC 라이닝 보강 콘크리트 파이프 등 황화수소에 대한 내구성이 큰 재료로 만들어진 파이프가 적용된다. 이러한 파이프는 무게가 가벼워 취급이 용이하고 강도가 높고 부식에 대한 저항성이 높아 30년 이상의

하수관 적용 실적이 있다. 하지만 이 방법은 파이프 잭킹을 위해 넓은 추진구가 필요하고 공장 제작된 파이프의 운송과 야적문제 등으로 최대 단면의 한계(약 3 m 이내)가 있으며, 변단면에서의 적용성이 어렵고 높은 단가 등으로 주로 소형 단면의 짧은 구간의 세미셴드 공법이나 파이프 잭킹공법을 이용한 터널구간과 맨홀 등에 적용된다.

변형관 공법은 축소된 단면을 열과 공기압 등으로 팽창시켜 거치시키거나 rolldown/ swagedown 라이닝을 터널 내에서 펼쳐 조립하는 공법이다. 이 방법은 기존 하수관거의 보수·보강용으로 적용되어 사용성과 내구성이 증명되었으나 직경 약 1 m 내외의 소형관에서만 적용이 가능하다.

약품투여를 통한 화학적 처리방법은 철염(Iron salt), 질산칼슘(Calcium nitrate), 질산나트륨(sodium nitrate) 등을 하수에 투여하여 황화수소를 분해하고 냄새를 제거하는 방법이다. 하지만, 화학적 처리방법은 화학작용이 일어나는데 시간이 걸리며 100년의 설계연한을 고려할 때 지속적인 투여는 운영비 측면에서 적절하지 않아 주로 펌프스테이션이나 저류조에 서만 일부 사용되고 있다.

희생용 콘크리트 라이닝 공법은 부식이 될 것을 고려하여 구조용 철근콘크리트 라이닝 위에 부식용 무근 콘크리트를 적용시키는 방법이다. 미국 LA의 하수터널의 경우 50년의 터널수명을 목표로 pH를 기준으로 황산에 의한 콘크리트 부식두께를 계산하여

Fig. 13. Herrenknecht Combisegment

희생용 콘크리트(sacrificial concrete)를 사용하였다. 하지만 콘크리트 부식 예측이 사실상 불가능하여 실제로는 6년 만에 일부구간에서 구조적인 문제가 발생하였고 과다한 보수비용이 발생하였다.

복합단면 콘크리트 세그먼트는 콘크리트 세그먼트 제작 시 세그먼트 폼 바닥면에 GRP (Glass Reinforced Plastic), pDCPD (Polydicyclopentadiene) 등을 주입하여 제작하는 것으로 열가소성 라이너를 부착하여 제작하는 one-pass방법과 차이가 있다. 대표적인 제품으로 Herrenknecht사의 콤비세그먼트(Combisegment)가 있는데 콤비세그먼트는 세그먼트 제작 시 개스킷을 일반 콘크리트 세그먼트와 달리 세그먼트의 안쪽에 설치하고(Fig. 13(a)) 세그먼트 조인트 부위까지 플라스틱 라이너로 보호함으로써(Fig. 13(b)) 원패스 열가소성 라이닝 공법에서 필요한 스트립을 이용한 조인트 접합작업이 필요하지 않은 장점이 있다. GRP를 이용한 콤비세그먼트는 2007년 개발하여 2009년 모스크바 Yazhny Sewage Pipeline에서 처음 사용되었으나 GRP의 특성상 단단하여 취급 중 깨지기 쉽고 개스킷을 설치하기 어려운 문제가 있었다. 이러한 단점을 해결하기 위해 GRP에 비해 유연한 재료인 pDCPD를 이용한 콤비세그먼트가 2013년에 개발되었으나 아직까지 현장에 적용된 사례는 없다. 콤비세그먼트는 현재 독일 Herrenknecht사에서 직접 제작하여 유럽지역을 제외한 지역에서 적용 시 운송비가 많이 들고 지속적인 공급에 대한 리스크가 있는 단점이 있다.

4. 콘크리트 부식방지 공법선정 프로세스

본 절에서는 사례를 통해 콘크리트 부식방지 공법 선정방법을 소개하고자 한다. 사례를 통해 서술된 내용은 특정 터널설계에만 적용될 수 있는 내용을 포함하고 있으며, 터널 설계기준 및 하수조건에 따라 콘크리트 부식방지 공법들의 적용성을 평가하여야 한다.

4.1 설계조건

본 사례의 하수터널은 총 연장 6.4 km, 내경 4.3 m, 콘크리트 세그먼트 라이닝으로 설계되었으며 설계수명은 최소 100년으로 하였다. 터널 심도는 약 10~22 m이며, 지하수위는 터널상부 약 5~14 m에 위치하였다. 터널 굴착 중 일부 구간은 투수계수가 큰 모래자갈층을 통과하며 일부구간은 후빙기의 전석을 포함한 매우 압축강도가 큰 과압밀 점토층을 통과할 것으로 예상되어 콘크리트 세그먼트를 이용한 토압식 실드공법으로 선정하였다. 본 터널은 복합 하수도 시스템의 일부로서 유지보수를 위해 하수를 우회시키기 어려워 잦은 보수가 필요하지 않는 콘크리트 부식방지 공법의 적용이 필요하였다. 본 터널의 방식공법 선정과 관련한 주요 설계요건은 다음과 같다.

- 약품투약 금지
- 설계 H_2S 농도 ≥ 100 ppm
- 운영 중 터널 내부 유지관리 및 보수 어려움
- 터널 내 Station 표기와 향후 탐상로봇을 이용한 터널내부 검사를 위해 적절한 부식방지 라이너의 색상 선정
- 부식 방지 공법이 정수압 조건에서 안정할 것
- Pullout test 시험 통과

터널 라이닝의 부식 가능성을 평가하기 위해 인접 지역에 건설되어 부식방지 공법이 적용되지 않은 상태로 약 10년간 운용중인 유사 직경의 하수터널의 상태를 점검하였다. 터널 내 하수의 유속이 빨라 주로 맨홀과 맨홀 인접 터널구간에 대한 점검만 이루어졌으며 터널 내부는 탐상로봇을 이용하여 점검하였다. 점검결과 맨홀에서는 철근노출 등 상당한 부식이 일어난 것으로 파악되었고 맨홀 주변 터널에서도 콘크리트가 일부 부식되어 떨어진 상태로 파악되었다. 반면 맨홀로부터 약 50 m 떨어진 터널 구간부터는 표면에 약간의 부식이 발생한 상태이나 보수가 필요한 상태는 아닌 것으로 파악되었다.

4.2 가중치 부여 매트릭스 평가 및 위험도 평가

콘크리트 세그먼트 방식공법의 선정을 위해 여러 콘크리트 방식재료의 단가 및 설치비용, 수명, 운영 및 유지관리 비용, 설치편의성 및 공사기간 등의 관점에서 정성적, 정량적 비교 및 평가를 위한 가중치 부여 매트릭스 평가표(weighting-factored evaluation matrix)를 Table 1과 같이 구성하고, 본 사례의 설계조건에 대해 설계단, 자문단, 발주처 간의 회의를 통해 각 방식공법의 적용성(1~5점)을 평가하였다. 또한 Table 1의 평가기준은 본 사례의 설계조건에 따른

가중치(weighting factor)를 적용하였다. 회의결과 얻어진 Table 1의 적용성 평가점수는 특정사례에 한정되므로 생략하였다.

Table 1의 결과를 토대로 본 사례 터널에 적용할 수 있는 콘크리트 방식공법을 Table 2와 같이 선정하고 각 옵션 적용 시 리스크를 검토하였다. Table 2에 정리되어 있는 리스크 중 본 사례 설계조건과 터널 시공조건 등을 고려하여 설계사의 경험과 주요 실패 사례를 바탕으로 관리가 가능하지 않은 리스크나 중대한 리스크가 예상되는 Option 4~8은 검토대상에서 제외되었다.

Table 1. Weighting-Factored Matrix Evaluation of Corrosion Protection Options

Evaluation Criteria Corrosion Protection	Construction Cost	Ease of Installation (Constructability)	Construction Schedule	Resistance to Hydraulic Scour Surchage	Abrasion Resistance	Required Corrosion Resistance	Track Record	Applicability to Segmental Lining	O&M Cost	O&M Risk	Repairability
Weighting Factor	8	9	8	7	6	10	8	7	7	8	6
One-pass Anchored Sheet Liner	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Two-pass Anchored Sheet Liner	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Two-pass Chemically Attached Sheet Liner	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Polymer Concrete Segment	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Silica Fume Concrete	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Coating	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Pipe Lining-Slip Lining	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Deformed Pipe Lining	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Sacrificial Concrete	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)
Sacrificial Shotcrete	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)	(1~5)

Table 2. Corrosion Protection Options and Related Risks for Screening Evaluation

Options	Corrosion Protection	Conc. Seg. Lining Int. Dia.	Risks	Results
1	One-pass Anchored Sheet Liner	4.3 m (14ft)	- Intensive labor effort for applying joint strips and weld at circumferential and longitudinal joints and patches on bolt pockets	Selected
2	Two-pass Anchored Sheet Liner	4.9 m (16ft)	- possible concerns about erosion of grout in invert and cracking of grout leading to loss of compression ring and liner failure - special formwork with means of banding liner tightly to forms	Selected
3	Two-pass Chemically Attached Sheet Liner	4.6 m (15ft)	- unstable for full hydrostatic pressure (water & air pockets) - sensitive to damp or wet conditions in tunnel for proper cure - requires abrasive blast cleaning to achieve proper substrate profile for good system adhesion	Selected
4	30cm Sacrificial Concrete (smooth finish)	4.9 m (16ft)	- uncertainties about the rate of microbial attack - observed instances of very rapid deterioration of concrete in sewage service	Eliminated
5	15cm Sacrificial Concrete (rough finish, shotcrete)	4.9 m (16ft)		Eliminated
6	Pipe Lining (Slip Lining)	4.9 m (16ft)	- cost-prohibitive (adding 70~100% to the base cost of the tunnel) - high shipping cost - does not easily negotiate tunnel bends; requires special length design	Eliminated
7	Polymer Concrete Segment	4.3 m (14ft)	- no track record - unanswered concerns regarding creep behavior and microbial attack of polymer concrete	Eliminated
8	Coating	4.3 m (14ft)	- unknown design life and higher frequency of failure - poor resistance to hydraulic scour - difficult to repair under future tunnel operating conditions	Eliminated

4.3 콘크리트 부식방지 대안선정 및 적용

설계사, 컨설팅 업체 등 전문가 집단과 발주처 미팅을 통해 진행된 콘크리트 부식방지 공법선정 프로세스는 복잡한 설계조건과 가능한 여러 부식방지 옵션에 대한 객관적 평가를 위해 최선의 방법일 것으로 판단된다. 본 사례 외에도 미국 셰크라멘토, 시카고, 클리브랜드 등의 하수터널 설계 시 유사한 프로세스를 통해 공법이 선정되었으며 성공적으로 시공이 되었다.

본 사례에서는 매트릭스 평가와 리스크 검토를 통해 option 3: Two-pass Chemically Attached Sheet Liner를 선정·적용되었다. 하지만 시공 시 불충분한 폴리머-폴리우레탄의 도포(약 80%, Fig. 6, Fig. 14)와 곡면의 터널 라이닝에 PVC 시트 부착 중 당겨짐 발생으로 인한 폴리머-폴리우레탄층 내 벌집구조형 공간

발생(약 20%, Fig. 15)으로 약 4,000 m² 누적면적의 air 또는 water pocket이 발생하였다(Fig. 7). 현장 조사 결과 전체 누적면적 중 대부분이 air pocket으로서 일반적으로 크기가 시간에 따라 일정하게 유지되었으나 일부 air pocket의 경우 내부로 물이 침투하면서 점차 팽창하였다. 시공 부주의로 인한 포켓발생 외에 공사완료 후 조사기간 동안 점진적으로 pocket수가 늘어나는 현상은 보이지 않았으나, 시간에 따라 폴리머-폴리우레탄의 점착력 저하가 발생하여 세그먼트 라이닝을 통한 지하수 침투로 인한 새로운 워터 포켓이 발생한 가능성은 있을 것으로 사료되므로 정기적인 점검과 유지관리가 필요할 것으로 판단되었다.

사례의 하수터널의 경우 콘크리트 부식방지 공법 적용 중 예상하였던 리스크 중 일부가 문제로 발생하였으며 선정된 공법의 적용이 결과적으로는 충분히 성공적이지는 못하였지만, 이는 공법선정의 방법론

자체의 문제가 아닌 대부분 시공상의 부주의로 발생한 것으로 판단되었다. 보다 성공적인 공법선정과 시공을 위해서는 보다 많은 분야의 전문가 집단의 의견을

수렴할 필요가 있으며, 공법선정 후 선정된 공법의 유경험자들의 자문과정이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 14. Typical Lap Joint Void Formation (CPI, 2008)

Fig. 15. Typical Honeycomb Failure (CPI, 2008)

5. 결 언

최근 기후변화로 인한 방재를 목적으로 한 하수 저류조의 필요성과 하수량 증가 및 강우로 인해 하수 유입량의 하수처리장 용량 초과시 하수가 처리되지 않은 상태로 하천에 그대로 방류되어 하천의 오염이 심각해짐에 따라 지하방수로/저류조 겸용의 대형 하수터널의 건설이 증가하고 있다. 콘크리트 하수터널의 경우 하수관거 내에서 발생하는 황화수소(H_2S)로 인하여 콘크리트가 부식될 수 있으므로 이에 대한 적절한 보호공이 필요하다. 최소 100년의 수명을 고려하여 설계된 대형 콘크리트 하수터널을 부식으로부터 보호하기 위해 여러가지 공법들이 소개되어 있지만 많은 정보들이 사실상 제조사로부터 수집되어 객관적인 평가를 하기가 수월하지 않다. 또한 대부분의 콘크리트 부식방지 공법의 적용 실적이 신설터널보다는 소형 하수관거의 보수를 위해 적용된 것이며 대형 하수관거에서의 장기간의 적용실적이 부족하여 특정 조건 하에서 콘크리트 부식 방지공법을 선정하는 것이 용이하지 않다. 따라서 적용된 공법들의 시간에 따른 거동 및 효과를 지속적으로 수집하고 공유할 필요가 있다고 판단된다.

본 논문에서는 콘크리트 부식방지 공법의 종류와 각 공법의 일반적인 장단점을 서술하였고 사례를 통해 콘크리트 부식방지 공법선정 프로세스를 소개하였다. 하지만 사례에 서술된 내용은 특정 터널설계에 적용되었던 예이며, 터널직경, 심도, 지하수위, 터널굴착방식, 지질조건 등 기본적 터널설계조건과 tender의 라이닝 부식방지와 관련된 설계요건, 전반적인 하수관거 시스템 구성, 예상되는 하수상태 및 흐름량, 환기 계획 등 여러 조건을 고려하여 가장 적절한 콘크리트 부식방지 공법들의 적용성을 평가하여야 한다. 설계사, 컨설팅 업체 등 전문가 집단과 발주처 미팅을

통해 진행된 콘크리트 부식방지 공법선정 프로세스는 복잡한 설계조건과 가능한 여러 부식방지 옵션에 대한 객관적 평가를 위해 최선의 방법일 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 경북대학교 학술연구비와 2012년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: 2012 R1A1A1042512) 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사합니다.

References

1. Tuxworth, J., Bosco, D., Terry, A. (2007), "Specification and quality assured installation of HDPE corrosion protection liners", Pipes Wagga Wagga, pp. 1-33
2. Uhren, D.J., Gilbert, G.W. (2001), "Matrix evaluation to resolve corrosion risks for a sewer tunnel in difficult glacial soils", 2001 RETC Preceedings, pp. 299-308.
3. Chapman, D.R., Frank, G. (2005), "Design considerations for corrosion protection in large diameter sewer tunnel construction", North American Society for Trenchless Technology NO-DIG 2005, paper A-3-02, pp. 1-13.
4. Redner, J.A., His, R.P., Esfandi, E.J., Sydney, R., Jones, R.M., Won, D., Andraska, J. (2004), "Evaluation of protective coatings for concrete", County Sanitation Districts of Los Angeles County, Whittier, California.
5. Nixon, R. (2006), "Odor and corrosion problems: two related issues requiring distinctly separate control strategies", The NEWEA Journal, pp. 23-27.
6. CPI (2008), Technical Memorandum on Recommended Path Forward for OOO Lined Portion of the OOO Tunnel, p. 20.