



최 성 열
(주)방재안전기술원
대표이사

일본의 대심도 지하방수로 운영

1. 서론

전세계 연안부에 위치한 대도시의 대부분은 지상공간이 완전히 개발되어 더 이상 개발할 수 있는 여지가 없다는 문제점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 대도시의 인구집중은 날로 심화되어 가고 있으며, 기후변화 및 도시화로 인한 열섬현상 가속화 등으로 인한 이상기상현상은 점점 더 격심해 지고 있는 실정이다.

이러한 이유들로 홍수침수피해를 예방·경감해야 하는 치수행정적 측면에서는 매우 곤란한 처지에 놓여 있는 실정으로, 손 써보기가 매우 어려운 환경이라 할 수 있다.

이러한 열악한 환경 하에서 거의 유일한 대안으로 부상하고 있는 것이 지하공간의 공동활용이라 할 수 있으며, 이는 지하공간을 공공의 목적에 맞게 개발하여 교통, 치수, 문화, 주거 등의 문제를 해결하고자 하는 것이다.

그 중에서도 가장 앞서가고 있는 분야가 지하공간을 활용한 대심도 지하하천 혹은 지하방수로 건설사업이며, 이러한 사업을 통해 기존 시가지에 내재하는 홍수범람 침수를 근원적으로 해결해 가고 있는 실정이다.

2. 일본의 대심도 지하하천(방수로)

방수로란 하천으로부터의 범람에 의한 홍수를 예방하기 위해 하천의 중간지점에 새로운 하천을 분기시켜, 바다, 다른 하천, 등으로 방류하는 인공수로를 말한다. 분수로라고 부르기도 하며, 교통 분야에서의 바이패스에 해당한다고 할 수 있다.

일본의 방수로에는 아래와 같은 것들이 있다.

통상적으로 홍수대책은 그 밖에도 하천개수, 댐, 우수지 등이 있다. 방수로는 이전에 한창 건설되었으나 하류에 만들어지는 일이 많아 주택이전에 막대한 시간과 비용이 들어, 결과적으로 비용면에서 우수하지 못한 경우도 있어, 현재 일본의 평야부에서 건축하는 일은 거의 없어졌다.

〈표 1〉 일본의 방수로

지역	방수로명	지역	방수로명	지역	방수로명
칸토우 지방	鴨川放水路 藤右衛門川放水路 幸手放水路 首都圏外郭放水路 綾瀬川放水路 三郷放水路 坂川放水路 国分川分水路 印旛放水路 荒川放水路 中川放水路 江戸川放水路 大岡川分水路 帷子川分水路 利根川放水路	추부 지방	福島潟放水路 関屋分水 大河津分水 樋曾山隧道 狩野川放水路 大谷川放水路 豊川放水路 新川 日光川放水路 新境川	홋카이도 토호쿠 지방	千歳川放水路 新釧路川 石狩放水路 旧琴似川放水路 永山新川 新北上川 赤川放水路 雄物川放水路
		긴끼 지방	新淀川 大和川放水路 なにわ大放水路 淀の大放水路 野洲川放水路	추고꾸 지방	旭川放水路 太田川放水路 斐伊川放水路

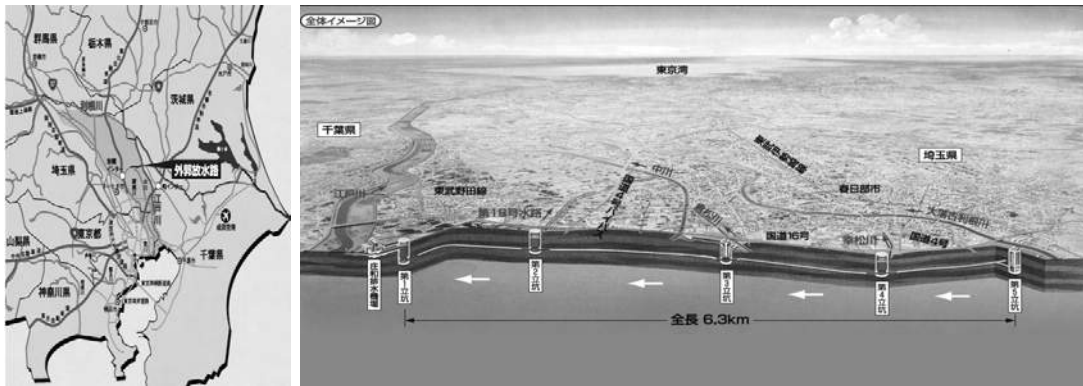
출처 : <https://ja.wikipedia.org/wiki/放水路>



〈그림 1〉 시나가와(信濃川)와 테마에(手前) 방수로(좌) 세키야(関屋)분수로/키타자와(北澁) 방수로(우)

또한 치토세강(千歳川) 방수로처럼, 환경보호 측면에서 건설이 포기 된 예도 있다. 최근에는 수도 권외곽방수로처럼 지하에 대심도 지하터널을 건설하고 거기에 방수하는 형태의 지하방수호가 대도시 중소 하천 치수대책에 응용되고 있다.

따라서 여기서는 일본에서 추진되고 있는 여러 지하하천·지하방수로 건설사업 중, 가장 최근에 추진되었던 총연장 6.3km의 수도권외곽방수로 건설에 대해 살펴보고, 이러한 지하하천이 갖는 재난요인을 소개하고자 하며, 이는 우리나라에서도 최근 지하방수로 건설에 대한 타당성 검토가 추진되고 있는 실정에서 유익한 정보가 될 것으로 사료된다.



〈그림 2〉 수도권외곽방수로 위치 및 현황도

3. 수도권외곽방수로 소개

본고는 일본국토교통성 에도가와(江戸川) 하천사무소에서 운영하고 있는 인터넷 홈페이지의 내용을 번역한 것으로 해당 주소는 <http://www.ktr.mlit.go.jp/edogawa/gaikaku/intro/index.html> 이다.

3.1 시설 목적

수도권외곽방수로는 넘칠 위험이 있는 중소 하천의 홍수를 지하로 가져와 지하 50 m를 관통하는 총연장 6.3 킬로미터의 터널을 통해 에도가와에 방류하는 세계 최대의 지하방수로이다.

일본이 세계에 자랑하는 최첨단 토목기술을 결집하여 2006년 6월에 완성하였고, 완성에 앞서 2002년부터 부분적으로 가동, 매년 7회 정도의 홍수를 안전하게 처리하여 주택지 등의 범람침수를 막고 있다.

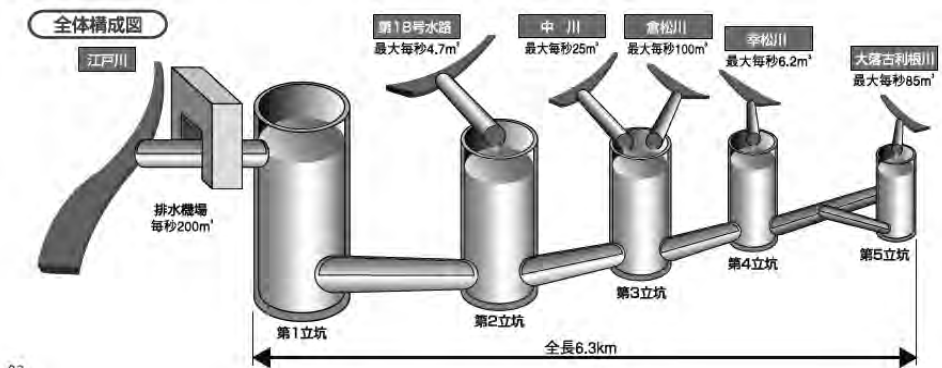
눈에는 보이지 않으나 홍수와 싸우고 있는 수도권외곽방수로의 스케일은 바로 기네스 급이다. 홍수를 취하는 직경 30m, 깊이 70m에 달하는 5개의 거대한 샤프트(입항)를 비롯해 땅 속 깊이 6.3km에 걸쳐 뻗어 있는 직경 10m의 지하터널, 무게 500톤의 기둥이 59개나 솟아 맘모스 저류조, 그리고 초당 200m³의 물을 배수하는 14,000마력 터빈 등 그 모든 것이 상상을 초월하는 규모이다.

3.2 시설 개요

■ 개요

수도권의외곽방수로는 일본 사이타마현 동부에 건설된 세계최대급 지하하천으로서 국도 16호 지하 50미터에 건설된 연장 6.3 킬로미터의 지하방수로이다. 시설은 각 하천에서 홍수를 유도하는 유입 시설, 지하에 저수하거나 하류로 유하시키는 지하수로 및 지하수로에서 홍수를 배출하는 배수펌프장 등으로 구성되어 있으며, 시설개요는 아래와 같다.

- 대상지구 : 에도가와(江戸川)와 나카가와(中川), 오오오토시후루가와(大落古利根川)에 쌓여 있는 저평지
- 지선연장 : 6.3km
- 대상하천 : 나카가와(中川), 쿠라마즈가와(倉松川), 오오오토시후루가와(大落古利根川) 등
- 송수방식 : 지하수로방식
- 배수하천 : 일급하천 에도가와(江戸川)
- 설치심도 : 지하 50m
- 단면형상 : 내경 10m
- 건설공기 : 1992~2006
- 유입하천 : 제18호 수로 : 4.7m³/초
 카가와(中川) : 25m³/초
 쿠라마즈가와(倉松川) : 100m³/초
 사치마즈가와(幸松川) : 6.2m³/초
 오오토시후루가와(大落古利根川) : 85m³/초
 에도가와(江戸川) 배수펌프량 : 200m³/초



〈그림 3〉 수도권외곽방수로 운영

수도권외곽방수는 홍수침수예방을 위해 지하방수로 방식을 채용하고 있다. 통상적인 방수로는 미사토(三郷) 방수로나 아와세가와(綾瀬川) 방수로와 같이 지상 개수로방식이 일반적이거나 본 시설의 건설장소는 국도 16호선이 재난발생시 응급상황에 활용되어야 한다는 요청 및 수리·지형 특성 등을 고려하여 지하하천 방식으로 채택되었다. 이러한 이유로 수도권외곽방수로는 국도 16호의 지하 50m에 위치하게 되었다.

■ 방수로의 운영

수도권외곽방수로는 홍수시에 운용 된다. 수도권외곽방수로에의 홍수 취수는 나카가와(中川), 쿠라마쓰가와(倉松川), 오오오토시후루가와(大落古利根川)와 등 각 하천의 제방에 설치된 월류언으로부터 자연월류에 의해 이루어진다.

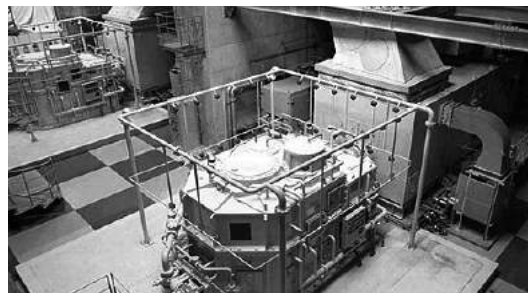
하천의 수위가 상승하여 월류언의 높이를 넘은 시점에서 홍수가 샤프트를 통해 터널 내로 유입하여 펌프에 의해 에도가와로 배수된다.

월류언의 높이는 주변의 최저 지반 높이와 비슷하며, 중소 규모 홍수에서도 충분히 기능 할 수 있도록 배려하고 있다.

3.3 주요 시설

수도권외곽방수로는 크게 3가지 기능으로 구성되어 있다. 지상에서 넘친 홍수를 지하로 끌어 들이는 기능, 물을 지하공간에 모아 두는 기능, 그리고 모인 물을 토출해 내는 기능이다. 각 주요 시설의 역할과 특징에 대해 소개하면 다음과 같다,

총저류량	67만m ³
계획배수량	200m ³ /sec
터널 연장	6300m
입항 규모	직경 30m, 깊이 70m
조압수조 규모	길이 177m, 폭 78m, 높이 18m



〈그림 4〉 수도권외곽방수로 조작실(좌) 및 배수펌프장(우)

■ 조작실

수도권외곽방수로의 두뇌라고 할 수 있는 장소. 기상정보에서 지반 내부의 수류 상태까지 모든 정보를 모으고 전체 시스템을 감시하고 제어하는 시설로서 감시조작 패널, 감시모니터, CCTV·방송 설비조작 패널, 태양열 시스템 등으로 구성.

수도권외곽방수로 조작을 위한 메인시설로서 유입시설의 게이트 폐쇄나 배수펌프장(지하터널, 입항, 조압수조에 남아 있는 우수를 예도가와에 방류하는 시설)의 지하에 설치된 배수펌프시설의 기동·정지 등의 작업을 관리. 배치되어 있는 20여개의 감시 모니터는 게이트 폐쇄나 펌프 등의 설비를 운전 할 때에 주변에 위험상황 등을 원격으로 감시.

■ 배수펌프장

거대 펌프를 활용하여 홍수류를 조압수조로부터 배수통관으로 보내는 역할과 수류를 안전하게 제어하는 역할을 갖음.

항공기용으로 개발된 10,300kW의 가스터빈을 개조하여 비행기 프로펠러를 대신하여 펌프를 돌리도록 되어 있음. 바람을 일으키는 부분과 풍차 부분으로 구성되어 있고 연료를 태워서 만들어지는 강한 바람으로 인펠라를 회전시켜 배수작업을 수행. 배수펌프장 지하에는 배수량이 초당 50m³인 거대 펌프가 4대 설치되어 있음. 이 펌프는 가스터빈으로부터의 에너지를 이용하여 인펠라를 고속으로 회전시킴으로서 우수에 에너지를 부여하게 됨.



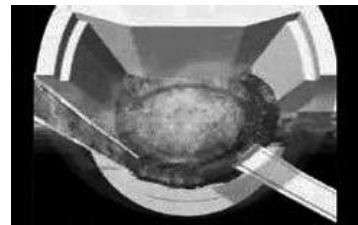
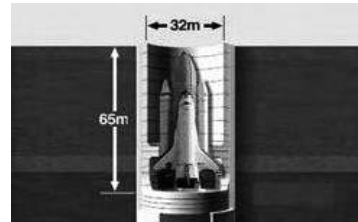
〈그림 5〉 수도권외곽방수로 펌프인펠라(좌) 및 배수통관(우)



〈그림 6〉 수도권외곽방수로 조압수조 전경



〈그림 7〉 수도권외곽방수로 터널 및 실드머신 전경



〈그림 8〉 수도권외곽방수로 입항(좌) 및 드롭샤프트(우하)

■ 조압수조

지하터널로부터 흘러온 우수의 세력을 약화시키고 완만하게 흐르게 하기 위한 거대 풀. 장엄한 분위조차 엿보이는 수도권외곽방수로의 상징적인 시설.

폭 78m, 길이 177m로서 축구장 정도의 넓이를 가지고 있으며, 높이는 18m 임. 이러한 넓이가 필요한 이유는 응급정지시에 발생하는 급격한 수압상승을 조정하기 위한 것으로 116개의 계단을 내려가야 바닥에 닿을 수 있음.

조압수조의 천정을 지탱하고 있는 기둥은 59개가 있으며, 기둥은 7m 깊이에 폭 2m, 높이 18m이며, 콘크리트 중량은 500톤.

■ 터널

각각의 입항을 연결하고 조압수조로부터 에도가와에 이어지는 나카가와 유역으로부터 유입된 홍수를 소통시키는 거대한 지하 길로서 터널 내경은 약 10m, 지하철보다 더 깊은 국도 16호선 지하

50m에 위치 함.

지층을 파고 나가면서 터널을 만드는 오니식 실드머신을 사용했으며, 실드머신 면반의 총중량은 약 120톤 정도임.

■ 입항

각 유입시설로부터 홍수를 차집하는 시설로서 공사중에는 터널 공사용의 작업기지의 기능을 함. 입항은 제1입항에서 제5입항까지 5개가 있으며, 각 입항에는 지하터널로 연결되어 있음. 각 입항은 약 70m 정도의 깊이를 가지고 있으며, 내경이 약 30m 정도가 되는 거대한 수직 갱도라 할 수 있음. 이곳에는 스페이스셔틀이나 자유의 여신상도 들어갈 수 있는 정도임.

입항의 역할은 실드머신의 출발 및 도착기지, 홍수차집시설, 관리용 차량의 반입이나 환기설비의 설치 등 방수로 유지관리를 위해서 활용됨. 제2입항에서 제4입항은 전동개폐장치가 붙어 있는 천정이 있어 유지관리에 편리함.

제3입항에서 제5입항은 우수의 유입에 와류식 드롭샤프트 형식을 채용. 이는 입항의 벽면을 연하여 우수가 회전하면서 떨어지도록 유입구의 모양을 변형시킨 것으로, 이는 우수가 60m나 떨어져서 바닥에 부딪 칠 때 발생하는 충격력을 완화시키기 위한 것임.

3.4 선진 기술

수도권외곽방수로 건설에는 일본 토목설계·시공·유지관리에 대한 최첨단 기술이 망라 되어 있으며, 해당 기술의 개요를 정리하면 다음과 같다.

〈표 2〉 수도권외곽방수 관련 첨단토목기술

구분	세부기술명
배수펌프장	초대형 배수펌프장
	입축와권사류 펌프 및 2축식 가스터빈
	정확한 침수경감효과의 달성
	리얼타임 통합관리시스템
조압수조	대규모 조압수조에 있어서의 수화열대책기술 및 특수앵커공법
	매스콘크리트대책으로 저발열시멘트 활용 및 이음선 균열 방지공법
	미래형 하중분산형 앵커기술
	조압수조와 입항의 접속기술

입항	저발열시멘트로 표면균열방지
	대심도를 견디고 차수 및 강도를 실현하기 위한 지하연속벽 시공기술
	깊이 140m 에서의 변위오차 5cm이내 실현을 위한 고정도굴삭정도관리시스템 기술
	와류식 드롭샤프트 시설
	자동화 오픈케이스 공법
	콘크리트를 광범위한 범위에 동시 타설하는 분기관 공법
터널	수압0.6파스칼을 극복한 고속실드터널 시행
	수평코타식 RC세그먼트 연결기술
	DRC세그먼트
	타이어식 자동반출차량기술
	실드기계의 수중도달공법
	굴삭토사의 재생이용기술
	고수압 하에서 개구율60%의 T자형 터널지중접합기술

출처 : <http://www.ktr.mlit.go.jp/edogawa/gaikaku/intro/03tech/index.html>

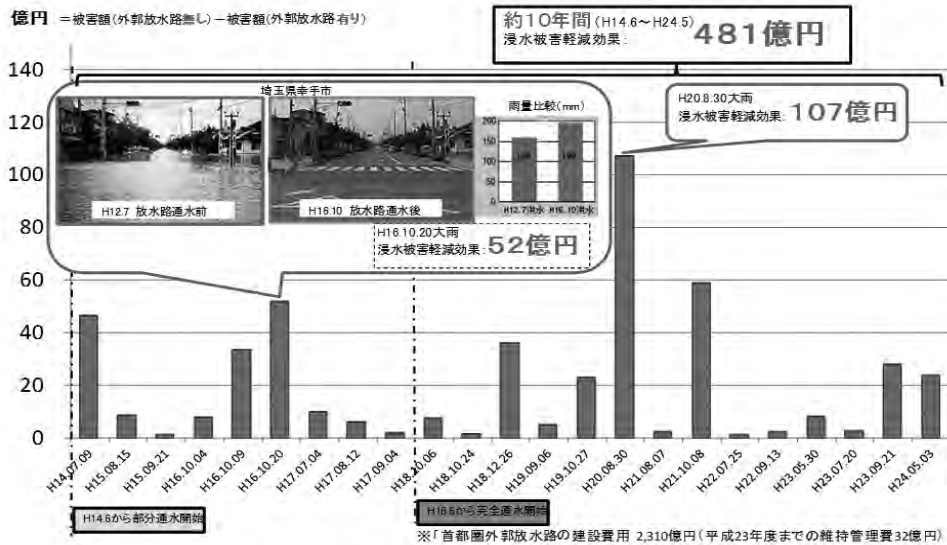
3.5 사업 효과

수도권외곽방수로는 2002년 부분통수에서 2013년 3월 시점에서 73번의 홍수조절 실적이 있다. 시험통수에 의한 치수효과는 눈부시며 나카가와·아와세가와 유역의 침수피해는 크게 줄었다.

지금까지의 치수효과를 보면 2000년 7월의 태풍 3호 때는 나카가와·아와세가와 유역에서 160mm의 강우량이 기록되어 침수면적은 약 137ha, 침수가옥 248호에 이르는 큰 피해를 있었다. 그러나 쿠라마쓰가와까지의 통수 개시 후 발생한 2004년 10월 태풍 22호에서는 199 mm의 강우량을 기록했지만, 침수면적은 약 73ha, 침수가옥은 126호로 침수피해가 크게 감소했다.

또한 2006년 6월에 오오토시후루가와까지의 통수를 완료하고 2006년 12월의 저기압에 의한 홍수는 172mm의 강우량을 기록했지만, 침수면적은 약 33ha로 침수가옥 85호로 침수피해를 더 줄일 수 있었다.

또한 사상최대의 유입량을 기록한 2008년 8월 저기압 호우 때도 수도권외곽방수로 가동에 의해 약 1,172 만m³의 홍수조절을 하고 침수 때문에 고생이 컸던 유역의 피해를 확실하게 줄였다.



〈그림 9〉 수도권외곽방수로 홍수피해경감효과

4. 대심도 지하하천 운영시 발생가능한 재난현상

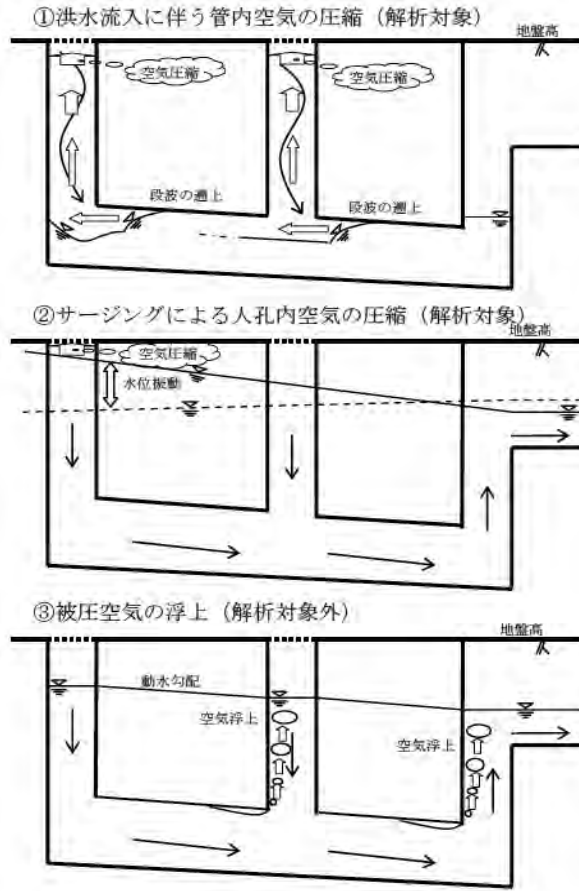
최근 도시화의 진전이나 지하공간 고도 이용에 의해 우수관에 사이폰 형식의 형상을 사용하는 사례가 확인된다. 사이폰 형상을 갖는 관로는 홍수 유입시 관로 내의 공기가 외부로 잘 배출되지 않을 수 있으며, 관로 내에 갇힌 공기가 압축을 받아 맨홀 뚜껑에서 압축 공기가 돌발적으로 분출하는 현상이나 맨홀 뚜껑이 비산하는 현상 등이 보고되고 있으며, 최성열¹⁾에 의해 논의된 바도 있다.

일본의 네야가와 남부 지하하천은 대심도 지하에 건설되는 사이폰 형상이 적용된 지하 하천이며, 이미 완성된 부분이 홍수저류조로 사용되고 있다. 현시점에서 사고, 파손 등의 보고는 없고, 운영상의 지장은 없다. 그러나 앞으로 큰 호우가 발생하면 다음과 같은 돌발적인 공기 거동이 발생할 위험성을 안고 있다고 할 수 있다.²⁾

해당 연구에서 사이폰 관로에 발생하는 수리현상에 대해 정리하면 〈그림 10〉과 같다. 공기거동에 주목하면, 먼저 ① 홍수유입에 따라 관내 공기가 맨홀 등으로부터 배출된다. 또한 단파의 소상에 따라 하류측의 맨홀에서 공기가 빠지지 않게 되어 상류측 맨홀의 관내 공기는 압축을 받는다. 다음으로 ② 만관 상태에 이르는 과정에서 서징 현상이 발생하고 입항 내의 수위가 상하를 반복한다. 이

2) 최성열 2004, 대규모 간선에 있어서 써차지 흐름에 동반되는 맨홀뚜껑 비산현상에 관한 연구, 한국방재학회논문집, 제4권, 제2호.

3) 高西春二 등 2006, 管内空気圧を考慮した圧力式地下河川の水利挙動解析, 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 第39回研究発表会, No.21.



〈그림 10〉 사이폰 형식 대심도 관로에서의 공기분출현상

때 맨홀 안에서 수면과 맨홀 뚜껑 사이의 공기가 압축을 받는다. 마지막으로 ③ 압력관 상태에서 안정하게 유하하고 있을 때에도 대심도 지하에서 피압된 관내 잔류 공기가 팽창하면서 맨홀 내에서 부상하고 맨홀에서 분출하는 현상이 발생한다.

이상과 같이 사이폰 형상을 갖는 관로에서는 공기 거동에 있어서 불안정한 수리현상을 가지고 있으며 이러한 원인에 의해 맨홀 뚜껑이 비산하거나 이로 인한 2차 재난이 발생하기도 한다.

5. 결론

대도시의 지상 공간은 더 이상의 개발이 여의치 않아서 지하공간의 공동적인 활용이 활발해 지고 있는 실정이다.

그 중에서도 기존 하수관망의 시설한계를 극복하기 위한 가장 강력한 수단으로 지하방수로 혹은 지하하천이 주목 받는다.

그러나 이러한 지하공간을 활용한 대규모 시설건설에는 막대한 예산이 수반 되고 건설기간이 매우 길 뿐만 아니라 지하공간이라는 구조적 문제로 압축공기로 인한 재난 가능성도 내재 하고 있다고 할 수 있다.

그러나 이러한 문제에도 불구하고 도시홍수침수저감을 위한 각종 대책 중에서도 도시 홍수침수를 물리적으로 간결하게 해결할 수 있는 거의 확실한 하드대책으로서의 매력 또한 매우 크다고 할 수 있다.

따라서 도시물순환 전체를 고려하면서 LID기반의 물관리를 기초하고 이러한 다양한 대책으로서도 침수해소가 어려운 경우에는 이러한 도심지 지하방수로의 건설에 대해 논의가 필요하지 않을까 한다.

참고문헌

1. <https://ja.wikipedia.org/wiki/放水路>
2. 최성열 2004, 대규모 간선에 있어서 써차지 흐름에 동반되는 맨홀뚜껑 비산현상에 관한 연구, 한국방재학회논문집, 제4권, 제2호.
3. 高西春二 등 2006, 管内空気を考慮した圧力式地下河川の水力挙動解析, 建設コンサルタンツ協会 近畿支部 第39回研究発表会, No.21.
4. <http://www.ktr.mlit.go.jp/edogawa/gaikaku/intro/03tech/index.html>