

도시홍수에 대비한 하천 및 우수처리에 관한 종합대책 사례(II): 시카고의 터널-저수지 계획



서 용 원 ●●●
영남대학교 건설시스템공학과 조교수
yseo@ynu.ac.kr

미국 시카고의 터널-저수지 계획(the Tunnel and Reservoir Plan, 이하 TARP)은 전세계에서 진행되고 있는 가장 큰 토목계획 중의 하나로 “대심도 터널 계획”이라고도 불린다. TARP는 총연장 약 170 km, 최대직경 10 m에 달하는 암반굴착 콘크리트 터널의 네트워크로 이루어져 있으며 시카고 지역의 오염제어와 홍수경감에 큰 역할을 담당하고 있다. 제1차 TARP계획은 2006년에 마무리되었으며 네 개의 터널 시스템으로 약 23억 갤런의 저류능력을 갖추게 되었다. 본 저자는 2008년부터 약 4년간 TARP 모델링 과제에 참여하였으며, 이를 기초로 본 지면을 빌려 TARP의 건설배경과 그 역할 그리고 여전히 남아있는 도전에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

합류식 우수관거 월류로 인한 오염

미시간 호로 흐르던 시카고강을 일리노이 강

으로 전환하고 세계에서 가장 큰 하수처리장 (Stickney 하수처리장, 일처리량 5,700,000 m³)을 운영하고 있음에도 불구하고 시카고의 강과 운하 그리고 미시간호의 오염은 날로 심각한 문제로 대두되었다. 이러한 문제의 근본적인 원인은 시카고의 합류식 관거로 인해 오염물질이 제대로 처리되고 있지 못하고 있기 때문이었다. 시카고시와 시외지역의 발전과 더불어 하수처리시스템으로 유입되는 우·오수의 양은 급작스럽게 늘어났으며 호우시 늘어난 우·오수를 처리하지 못하고 일년에 100일 이상 오염된 월류수를 주변 지천에 방류하게 되는 상황이 발생하였다. 특히 큰 호우사상이 발생할 경우 시카고강은 다시 전환전 흐름상태로 미시간호로 흐름의 방향을 바꿔야하는 상태가 강제적으로 발생하였으며 이는 즉시 미시간호의 오염으로 이어졌다. 이로 인해 해안 폐쇄와 같은 상황이 자주 발생하였으며 미시간호의 수중생태계에 미치는 영향도 날로 더해갔다.

대심도 터널(The Deep Tunnel)

1889년에 설립된 MWRDGC(The Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago)는 시카고시를 포함하는 쿡 카운티 지역의 특수목적기구(a special-purpose district)으

로서 지역의 우수처리와 홍수감소를 그 목적으로 한다. 시카고 강과 그 지류 그리고 미시간호의 오염방지를 주목적으로 MWRDGC는 1972년 연방 및 일리노이주의 수질기준을 만족하기 위한 가장 효율적인 방안으로 터널-저수지계획(the Tunnel and Reservoir Plan, TARP)을 채택한다. TARP의 가장 중요한 목적은 미시간호를 하수로 인한 오염으로부터 보전하며, 주변 하천의 수질을 개선하는 것 그리고 마지막으로 시가지 침수를 방지하기 위한 방류공간을 제공하는 것이다. 1975년 시작된 제1기 TARP 계획은 오염제어를 주 목적으로 Mainstream, Des Plains, Calumet, 그리고 Upper Des Plains의 네 개 터널 시스템의 건설을 그 목적으로 하였고 2006년 완공되었다(그림 1). 호우로 인한 합류식 하수관거시스템의 월류수는 터널 시스템으로 유입되며 호우 종류이후에 다시 펌핑을 통해 터널 시스템의 우수를 하수처리장으로 이송하여 완전 2차 처리를 거쳐 방류기준을 만족한 뒤 하천으로 방류되며, 터널 시스템은 다시 비워져 다음 호우로 인한 월류수의 저장공간을 제공하게 된다.

제2기 TARP계획은 주로 홍수저감 및 제어에 주 초점을 맞추고 있으며 또한 제1기 계획으로 제공되는 우수처리 및 제어기능을 향상시키는 데에도 그 주목적이 있다. 미공병단의 COE(Chicagoland Underflow Plan)에서는 연방국가경제개발계획의 범주에서 제2기 TARP계획에 주목하였으며 이를 통해 3개의 저수지 건설(the Gloria Alitto Majewski, McCook, Thornton)을 제안하였다. 350만 갤런 용량의 Majewski 저수지는 미공병단에 의해 1998년 완공되었으며 총공사비는 4천5백만달러에 달하였다. 완공이후 현재까지 Majewski 저수지로 인한 홍수피해저감액은 2억5천만달러에 이른다. McCook 저수지는 현재 공사중이며 완공될 경우 10 BG의 저수용량을 확보할 예정이다. 1차 완공은 2017년이 목표이며 완공될 경우 3백십만 명으로 구성된 37개 지역에 연간 9천만달러의

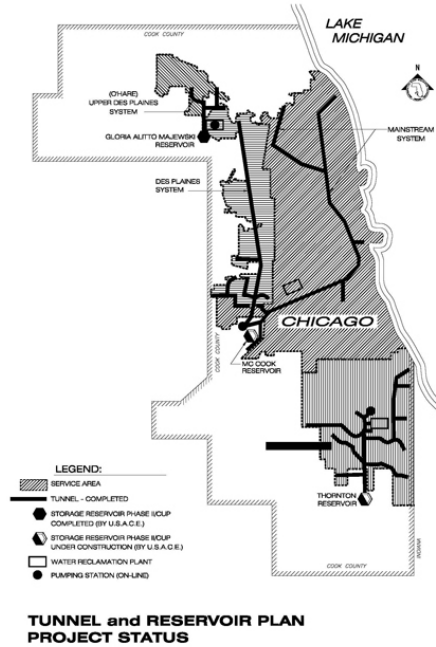


그림 1. Tunnel and Reservoir Plan (MWRDGC)



그림 2. 1차 완공된 Thornton 저수지(미국 환경청)

홍수피해저감이 기대된다. Thornton 저수지의 건설은 2차로 나누어 진행되며 31억 갤런의 저수량을 제공하는 1차 건설(그림 2)은 국립자원보전국(NRCS)에 의해 2003년 완공되었다. 이 저수지는 9개 지역의 하천월류수를 저감하여 지금까지 약 260억 갤런의 홍수량을 저감해왔다. 2차 건설은 NRCS와 CUP가 공동으로 건설하며, 2015년 완공 목표로 영구적으로 79억 갤런의 저수량을 제공할

것으로 예상하고 있다. 이 저수지로 인하여 55만 명이 거주하는 15개 지역에서 연간 4천만 달러의 홍수피해액 절감을 기대하고 있다. 이와 같이 제2기 TARP계획, 즉 주로 3개의 저수지 건설을 목적

으로 하는 목표 완공시키는 2029년이고, 3개 저수지 건설로 확보되는 총 저수용량은 175억 갤런에 달한다 (그림 3).

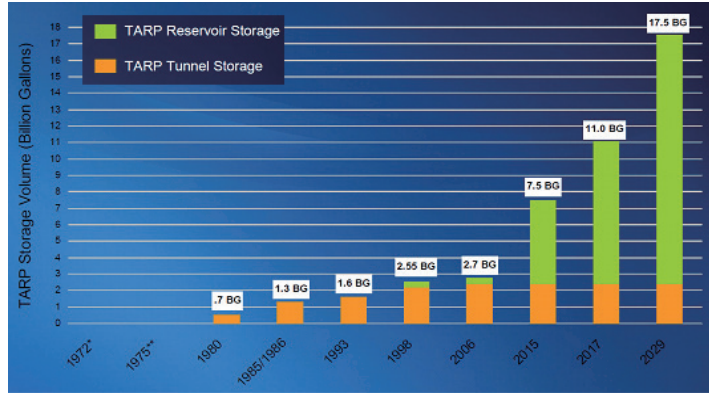


그림 3. TARP로 확보되는 저수용량 (Cantone, 2011)

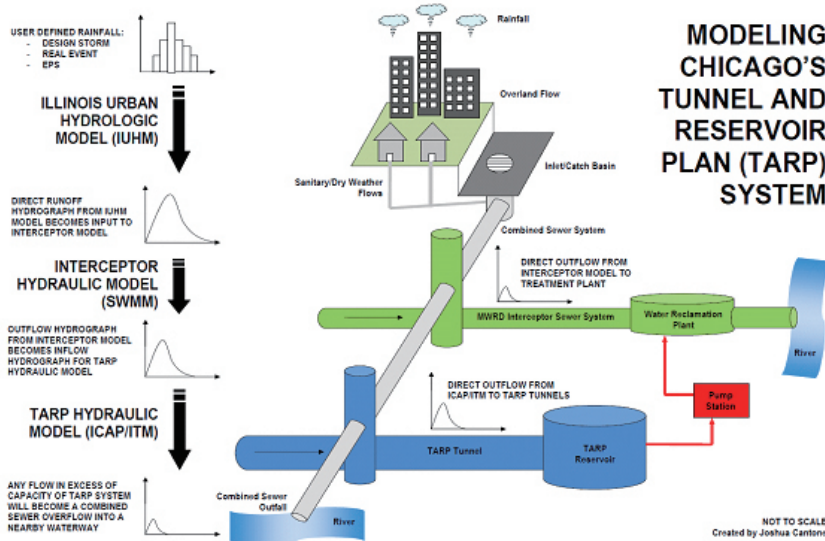


그림 4. TARP의 모델링 과정(Cantone, 2011)

시스템의 운영과 모의

TARP는 170 km의 터널 시스템, 4개의 저수지, 150여 개소의 수직갱, 약 500개소가 넘는 합

류식 우수관거의 월류 방류구, 조절 수문 및 연결 수리구조물을 포함하고 있는 거대한 시스템이다. MWRDGC는 2006년 이후 일리노이대(UIUC)에 TARP 시스템의 실시간 운영 모형 개발에 대한 연

구과제를 발주하여 진행하여오고 있다. 연구과제는 수많은 도면을 취합하여 데이터베이스화하는 1단계(Physical Inventory), 각 수문, 수리 모형 개발의 2단계(Modeling), 각 모형들을 결합한 시스템 개발(Tightly Coupled Model)의 3단계로 나누어 진행되고 있으며 TARP의 진행과 더불어 각 단계가 계속 업데이트되며 현재까지 진행되고 있다. 연구과제의 주된 동기는 실제 완성되어 있지 않지만 완공된 상태를 가정하여 지속적으로 시스템을 모의하며 시스템의 병목지점(bottleneck)을 찾아내는 데에 있다. 시스템의 병목지점으로는 터널 용량의 부족, 저수지 용량의 부족, 그리고 마지막으로 연결 구조물의 용량 부족 등을 연속적으로 체크하여 과거 최대 호우 혹은 계획 강우사상으로 인한 시스템의 취약지점을 파악하는데 그 목적이 있다. 최종적으로는 이 과제를 통해 월류 방류구 수문 조절의 최적 조합과 같이 시스템 운영에 있어 시스템의 용량을 넘어서지 않으며 최적의 운영 대안을 찾아내는 데 그 목적이 있다(그림 4).

성과

TARP로 인한 효과는 즉각적으로 시카고 강, 칼루멧 강 그리고 다른 수로들의 수질개선으로 나타났다. 연평균 100일 이상이었던 월류수 방류가 100일 이하로 줄어들었다. 사라졌던 어종들이 다시 회귀하였고 마리나와 강변을 따라 조성된 수변 휴식공간과 휴게시설, 음식점 등에 호황이 돌아왔다. 하천을 따라 시카고의 건축물을 관람하는 투어와 같이 관광 상품들이 연이어 개발되었고 많은 관광객들을 끌어들여 지역경제를 활성화시켰다. 워터프론트를 따라 부동산의 가치가 급상승하였고 시카고지역의 거주민들은 시카고 강의 시스템을 주된 자산으로 여기게 되었다. TARP는 이로 인해 미토목학회(ASCE)로부터 가장 뛰어난 토목계획상, 미국 환경청으로부터 Nation's Top Clean

Water Act 성공담으로 언급되는 등 많은 성과 영예를 안게 되었다. 또한 전세계적으로 현대 도시 물관리의 대표적인 사례로 많은 언급이 되고 있다.


한계와 방향

2013년 4월 18일 밤새 약 127 mm가 넘는 호우가 시카고 지역에 발생하였다. 많은 고속도로 교차로가 침수되어 통행이 제한되었으며 지하철 운행 지연되었으며 심지어 오헤어 공항에서는 400편의 항공이 결항되기도 하였다. 그리고 Des Plains 강과 Fox강의 월류로 거주민들이 피난을 하는 등 많은 이재민이 발생하였다. 이로 인해 11억달러의 호수가 미시간호로 방류되었으며 이는 지난 30년간 가장 큰 오염물 방류로 기록되었다. 이로 인해 시카고 시 특히 MWRDGC의 TARP에 대한 비판 여론이 증가하였다. 친문학적인 공사비를 들여 공사하고 있는 상황에서 아직까지 홍수와 오염에 대한 우려를 말끔히 해소하지 못하고 있다는 것이 그 주된 내용이었다. 아직까지 완공이 되어있지 않은 점, 완전한 운영체계가 갖추어져 있지 않은 점 등 1975년 이후 29년이 경과한 지금까지 아직까지 완벽한 시스템을 내놓지 못한 데에 대한 비난 여론은 수긍할만하다. 또한 가이저링(geysering)과 같이 거대한 터널의 수직갱으로부터 마치 간헐천이 폭발하듯이 수십미터의 분출이 도심지 한가운데서 일어나는 부작용도 위험요소로 손꼽히고 있다. 그럼에도 불구하고 홍수위험과 오염 제어라는 큰 목표를 가지고 이러한 거대한 시스템을 장기간동안 지속적으로 추진하고 있는 미당국의 노력은 높이 평가할 수 있을 것이다. 워낙 방대한 시스템이라 최적 운영에 대한 대안도 단 한 가지가 아니라 시나리오별로 여러 가지로 나오고 있는 상황에서 모든 지역 내 구성원을 만족시킬 수 있는 대안을 도출하는 것도 쉬운 문제가 아닐 것이다. 앞으로의 노력은 계속 이러한 시스템

의 최적운영과 시스템 취약지점의 발견에 더욱 집중될 필요가 있는 것으로 판단된다.

맺으며

미국 일리노이 주는 우리나라 면적과 비슷하면서도 최대 고도가 300 m에 불과한 대평원에 위치하고 있다. 때문에 시카고라는 지명이 썩은 양파라는 의미의 인디언 부족의 말에서 유래된 것과 같이 예로부터 홍수배수가 큰 문제로 지적되어왔다. 많은 인구가 모여 살게 되며 자연을 보존, 혹은 극복하기 위해 만든 거대한 인공 시스템으로

인해 또 다시 안정성, 최적화, 효율성과 같이 다른 공학적 이슈들이 발생하는 점은 다소 아이러니한 문제일 수 있다. 그러나 이러한 부차적인 문제들을 모두 포함하여 끈질기게 목표했던 원래의 순기능과 최종 완공의 목표를 위한 노력을 이어나가고 있는 모습에서 TARP는 다른 지역에서 참고할 수 있는 많은 공학적 사례와 본보기를 제공하고 있다. TARP에서 제기되는 공학적인 문제들이 다만 그 지역에 국한된 것이 아니라 이를 반면교사로 삼아 전 세계 공학자들에게 영감과 문제 해결의 실마리를 제공할 수 있는 계기가 되었으면 하는 바람과 함께 글을 마치고자 한다. 



-
- Cantone, J (2011). An innovative approach to simulating MWRDGC's Tunnel and Reservoir Plan (TARP), CH2M Hill, Chicago, IL
 Friends of Chicago Riner, www.chicagoriver.org
 MWRDGC, www.mwrdd.org
 The Chicago Tribune, www.chicagotribune.com
 U.S. EPA, www.epa.gov
-