

침입수 / 유입수 찾아내기

- 집수 시스템 갱생은 주의 깊은 분석과 우선순위 분별 필요

❖ 본 논문은 미국하수도협회(WEFTEC)의 협회지 2004년 10월에 게재된 논문(Rooting out infiltration / Inflow - Rehabilitating collection systems takes careful analysis and prioritization)을 발췌, 번역한 것입니다.

1. 서론

미국에 집수 시스템의 새로운 규정이 구현됨에 따라 폐수 처리 기관은 파이프에 침입수 / 유입수(Infiltration/inflow(I/I))를 최소화하기 위해 노력하고 있다. 그러한 기관 중 하나인 글래드스톤 시(미조리주) 수도국(Water Work Department)은 노후 맨홀과 파이프를 갱생하여 집수 시스템에서 I/I를 효율적으로 줄이게 될 플랜트를 구축했다.

1999년, 증가된 강우 유출수(Wet Weather Flows), 기층부 역류, 오수거 월류수(Sanitary Sewer Overflow : SSO)로 인해 글래드스톤 시정부는 집수 시스템에서 I/I의 범위를 결정하고, 노후 된 맨홀과 파이프를 식별하고 갱생 프로세스를 구축했다. 이를 위해, 시정부에서는 오수관거 250,000 피트(76,000 m)와 1,162개의 맨홀이 포함된 2,000에이커(800 헥타르)의 면적의 강우와 유량을 모니터링했다. 11개의 개방형 채널 유량계와 4개의 측우기가 이 연구에 사용되었다. 또한, 노후 파이프와 맨홀에 대한 지리 정보 시스템(GIS)을 만들기 위해 Black & Veatch Corp.(미조리주 캔자스시티)가 개발한 소프트웨어 프로그램인 오수관거 관리 시스템(SSMS)이 사용되었다.

2. 본론

(1) 침입수 / 유출수 식별과 수량 파악

① 유량과 우수 모니터링

강우 유출수계 흐름과 우수량 데이터 사이의 상관관계를 파악하기 위해 글래드스톤의 우수량을 모니터링했다. 각각의 우수 측량계 현장에 대해 일상적인 총 우수량과 분포량을 파악해서 알려진 우수 강도, 기간과 빈도수에 대한 관계와 비교되어 각 폭우의 순환 사이클을 판단했다.

상당한 I/I를 초래했던 집수 시스템의 부분을 식별하기 위해 건조한 기후와 강우 기후 동안의 유량을 모니터링했다. 우수량 데이터와 함께 유량 모니터링 데이터는 예측 강우 유출 I/I 계수를 제공했으며, 이 계수는 해당 폭우 기간 동안의 유입수를 예측하기 위해 사용된다. 유입수 계수는 집수 시스템의 '누수' 정도에 대한 예측치를 제공했다. 각각의 모니터링한 폭우에 대해 계산된 특정 유입 계수에 기반한 평균 'K'가 분석을 위해 사용되었다. 평균 유입 계수는 아래의 식 1)을 통해 일정한 반복 간격으로 해당 폭우에 대한 유입수를 판단하기 위해 사용된다.

식 1)

$$Q = KiA$$

여기에서, Q = 최고 유입량
K = 유입 계수
I = 우수 강도(in/h)
A = 개발된 면적(에이커)

유입 계수가 높을수록, 집수 시스템은 더 많이 노후된다. 집수 시스템에 대한 일반적인 설계 유입 계수는 약 0.003~0.004이다. 글래드스톤 시의 연구 면적의 경우, 유입 계수는 0.010~0.028로써, 높은 수준의 I/I를 나타낸다. 에이커/하루 당 최고 유량의 단위 유량(갤론으로)은 시스템 무결성의 또 다른 지표이다. 캔자스시티의 새로운 시스템의 경우, 이 유량은 대개 1,200~5,000gal/dc/ac이다. 글래드스톤 시의 연구 범위에서, 최고 유량율은 12,000~36,000gal/d/ac의 범위이다.

우수량이 0.1인치(2.5mm)를 넘는 것으로 정의되는 각 폭우에 대해, 우수 강도와 최고 강우 유출수 계수와 비교했다. 평균 유입 계수를 계산하고 유입량은 우수 강도에 의거하여 판단되었다. 분석된 폭우 사례를 로그-로그에 표시하여, 관거 용량과 설계 폭우 강도에 기반하여 모니터링한 면적의 전반적인 폭우 예방 레벨을 편리하게 볼 수 있도록 했다. 그림 1)에는 선택된 유입 계수와 기존 파이프

흐름 용량과 관련하여 측정된 폭우 사례 사이의 관계가 표시된다. 모니터 영역의 집수 시스템은 1년 이하의 폭우 레벨 처리 용량을 보인다.

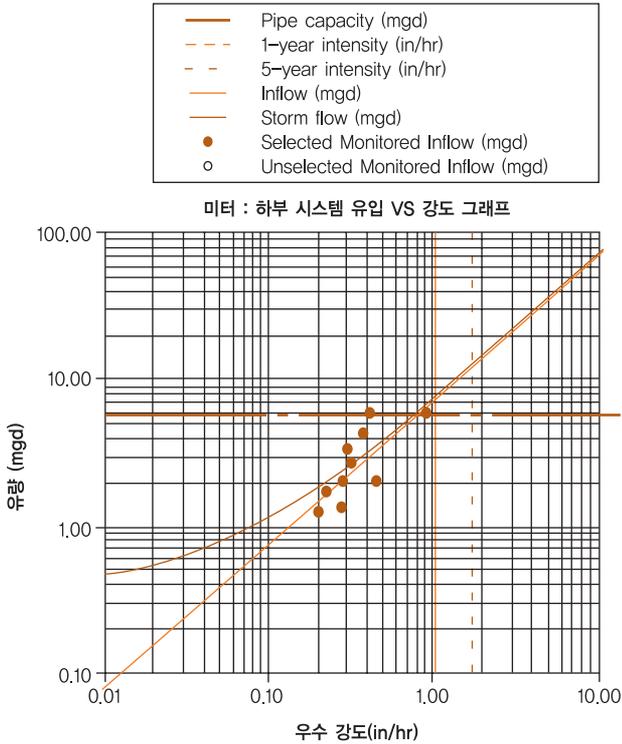


그림 1) 유량 VS 우수 강도

② 현장 조사

유량과 우수 모니터링에 더해, 하수 시스템의 물리적 상태를 평가하고 I/I의 잠재적 출처를 파악하기 위해 맨홀 검사와 시각적 파이프 검사, 스모크 검사와 폐쇄 회로 텔레비전(CCTV) 검사를 포함한 현장 조사가 수행되었다.

현장 조사에 따라 I/I가 집수 시스템에 들어가는 지점에 대한 중요한 정보가 수집한 후, 검사 보고서를 SSMS에 입력하여 식별된 결함 유량의 수량을 파악했다. 이 프로세스는 유량과 우수 모니터링을 통해 모은 총 I/I와 관련하여 검사를 통해 발견된 I/I의 양을 판단한다. 데이터가 SSMS 점검 데이터베이스에 입력되면, SSMS는 수신된 등급에 기반하여 결함의 수량을 파악하고 갱생 비용과 흐름을 배정한다. 결과적으로 꺾론/하루 당 비용 등급(\$/gpd)에 기반한 결함 우선순위 파악 자료가 생기게 되어, I/I 제거에 대해 더 많은 비용 절약이 가능하다. 글래드스톤 시의 경우, 가장 높은 \$/psd 결함은 프레임 실(Seal) 뿐만 아니라 장착 뚜껑이 느슨해진 맨홀이다.

민간 부문에서 상당한 양의 I/I가 배출되는 한편, 글래드스톤 시에서의 검사는 스모크 테스트를 통해 식별된 민간 분야를 제외하고, 공공 분야의 I/I 소스에 대해서만 수행되었다. 그림 2)에는 공공 분야의 I/I 비율, 민간 분야 I/I 소스의 예상 비율이 나와 있으며 알 수 없는 소스로부터의 I/I의 비율은 '식별 불가'로 분류된다. 민간 분야의 예측치는 시정부 직원과의 논의에 기반한 것이며 민간 분야의 여러 가지 스모크 검사를 참고한 것이다. 하지만 스모크 검사에 따르면 민간 분야 I/I는 총 I/I에서 작은 부분을 차지한다.

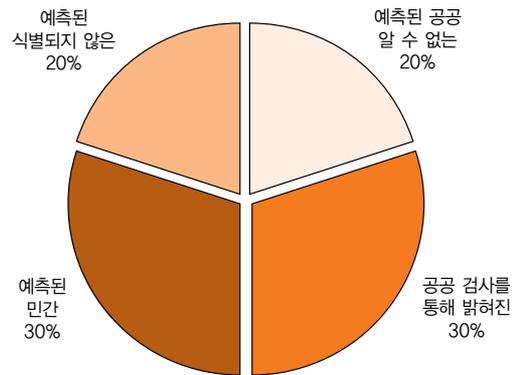


그림 2) 식별 및 예측된 총 유입수 / 침입수 소스

현장 검사는 I/I의 소스의 위치를 파악하고 구조적 문제와 유지보수 문제를 찾는데 효율적이다. I/I를 식별하고 수량화 하는 것은 집수 시스템 용량을 극대화하는데 중요하긴 하지만, 기존 구조의 문제와 잠재적인 구조적 문제를 식별하는 것도 적절한 운영 시스템을 유지하는데 있어 필수적이다.

CCTV 검사에 따르면 연구 분야의 파이프 중 약 18% 만에 상당한 결함이 있었다. 구조적인 파이프 문제로 인해 많은 양의 I/I가 발생하는 것은 아니지만(연관성은 있음), SSO로 이어질 가능성이 있다. 관로 유지보수의 효율성은 전반적인 I/I 검사 프로그램 중에도 밝혀진다. 예를 들어, 맨홀과 CCTV 검사는 맨홀과 파이프 세척 프로그램의 전체적인 효과를 보여줄 수 있다. 글래드스톤 시의 검사에서는 연구 영역에서 거의 절반의 파이프에서 많은 수의 뿌리가 발견되었다. 이러한 결과는 뿌리와 잔해가 역류와 SSO를 초래하지 않도록 방지하기 위해 더 자주 파이프와 맨홀을 청소해야 한다는 사실을 나타낸다.

③ GIS 인벤토리와 유지보수 매핑

글래드스톤 시에서 수행한 작업 중 한 가지는 파이프와 맨홀 현장

데이터를 모아서 GIS 데이터베이스에 넣는 것이었다. 이전에는 이러한 데이터가 하드 카피 도면으로 유지되었다. 파이프와 맨홀의 GIS 인벤토리는 다음과 같은 혜택이 있다.

- (a) 시스템 분석을 위한 수력압 모델을 만들 수 있다.
- (b) 운영과 유지보수 활동을 관리하는 플랫폼을 제공한다.
- (c) 쉽게 추출되는 데이터에 기반하여 갱생 도면을 만들 수 있다.
- (d) 보수가 먼저 필요한 파이프와 맨홀이 표시된 맵 북(Map Books)을 사용하여 현장 작업자는 유지보수 부분을 쉽게 찾을 수 있다.

현장 조사 데이터와 시공 데이터로부터 시스템의 인벤토리가 작성되어 GIS에 입력되었다. 이에는 정확한 맨홀 위치, 둘레 높이, 둘레에서 인버트(Rim-to-invert) 깊이가 포함되어 파이프 인버트 높이를 정할 수 있다. 맨홀 좌표와 파이프 인버트 높이 사이의 거리에 기반하여 파이프 경사가 계산되었다. 각각의 하부 시스템 내의 위치에 기반하여 맨홀에 대해 순번 시스템(numbering system)도 만들었다. 하부 시스템은 집수 시스템에 영향을 미치는 총 면적을 판단하기 위해 정의되었다. 이러한 경계는 거리 중심선 데이터의 도움으로 GIS로 작성되었으며, 총 시스템 면적과 각 하부 시스템의 면적은 에이커로 계산되었다.

GIS 데이터베이스를 찾을 후, 갱생이 필요한 파이프와 맨홀에 대한 전반적인 개요를 제공하기 위해 맵이 작성되었다. 맵 북은 1:1200 척도(1인치 = 100피트)로 계산되어 건물과 거리와 비교하여 파이프와 맨홀의 위치를 표시해서, 현장 작업자는 갱생 필요 분야를 쉽게 찾을 수 있다.

(2) 갱생 프로젝트 식별과 우선순위 결정

I/I 연구를 기반으로 하여, 문제가 있는 맨홀과 파이프를 복구 또는 교체하기 위해 SSMS의 도움으로 도면이 개발되었다. SSMS 소프트웨어는 이러한 유지보수의 우선순위를 정하기 위해 기본 I/I 율과 결함 복구비용을 포함하는 데이터베이스를 사용한다. 갱생 프로젝트의 우선순위를 결정하기 위해 사용된 기준에는 다음이 포함된다.

- (a) 비용 효율적으로 복구할 수 있는 결함이 있는 맨홀과 파이프
- (b) 용량에 문제가 있는 맨홀과 파이프
- (c) 폭우 하수도 또는 개울 근처에 위치한 결함 있는 맨홀과 파이프
- (d) 심각하게 손상되었거나 무너진 파이프 또는 파괴된 부분의 비

율이 높은 파이프

I/I 제거는 기록, 유량 평균화, 처리 및 복구비용의 분석을 기준으로 한다. 글래스톤 시의 경우, 약 20%의 I/I를 제거하는 것이 비용 효율적이며, 이는 제거하는데 갤론/일 당 0.70달러(\$0.18 per L/d) 이하의 비용이 드는 결함에 해당된다.

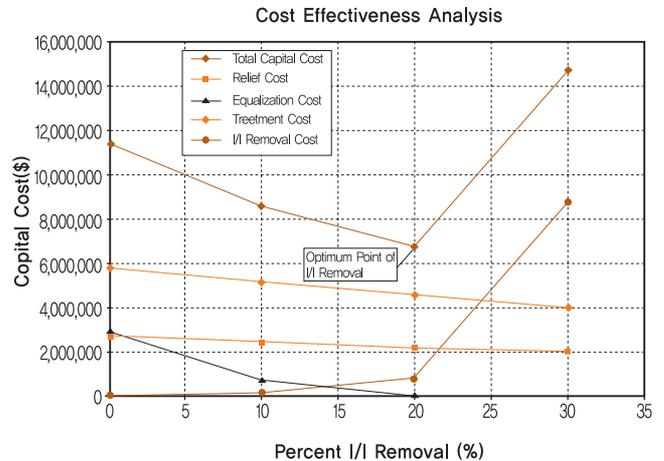


그림 3) 비용 효율적 분석

대개 맨홀의 굴뚝과 둘레 사이에 있는 결함이 복구하는 측면에서 가장 비용 효율적이었다. 글래스톤에서 I/I 대부분은 맨홀의 상단 부분에 위치한 결함으로 인한 것으로 밝혀졌다. 가장 일반적인 결함은 상당한 양의 유입수가 집수 시스템에 들어가지 못하게 효율적으로 방지할 수 없을 정도로 약화된 프레임 실(Seal)이었다. 다른 기준은 복구의 측면에서 비용 효율적이지 않기는 하지만, 적절한 집수 시스템 운영, 유지보수와 관리와 직접 관련된다. 비용 측면에서 보면 제거하는 것이 효율적이지만 수압 또는 용량 관련 부분에 위치하지 않은 파이프는 향후 교체될 것이기 때문에 복구해서는 안 된다.

우수관 또는 개울 근처에 위치한 결함이 있는 맨홀과 파이프는 높은 유입 확률로 인해 좋은 갱생 대상이다. 글래스톤 연구 분야에는 개울 근처에 있는 또는 가로지르는 심각한 침입수가 생기는 여러 개의 맨홀과 파이프가 포함된다.

물이 고이는 현상(Ponding)이 있는 맨홀은 강우 유출수를 트랩하여 물이 맨홀 시스템을 통해 집수 시스템으로 들어가게 해준다. 맨홀을 업그레이드하면 물이 고이는 현상이 제거되고 집수 시스템으로의 과도한 유량이 최소화된다.

많은 SSO와 역류는 과도한 I/I가 집수 시스템으로 들어가기 때문

에 발생하지만, 구조적인 붕괴도 많은 문제를 초래한다. 건조 및 강우 유출수 역류와 SSO를 줄이기 위해 정기적인 집수 시스템 검사가 필요하다.

(3) 계획서 개발

우선순위 정하기가 완료되면 맨홀과 파이프 갱생에 대한 특정한 요건을 명시한 계획과 입찰 표가 완료된다. 가능한 한 비굴착 (Trenchless) 갱생, 파이프 파괴(Pipe-break) 부분의 제자리 교체 파이프(Cured-in-place Pipe) 두께 증가, 맨홀 교체보다는 복구를 고려해야 한다.

맨홀 검사 양식 데이터를 세부 입찰 항목으로 처리하는 매트릭스를 사용하여 입찰 표가 개발되었다. 예를 들어, 맨홀 검사 양식 데이터베이스에 맨홀 물 고이는 현상 또는 프레임 실 결함이 포함된 경우, 매트릭스는 이를 입찰 항목에 '경사 조정으로 프레임 실 갱생'이라는 제목으로 처리해야 하며, 물이 고이는 깊이에 따라 굴착이 필요하지 결정할 것이다. 맨홀 검사 매트릭스에서는 맨홀 검사 원 데이터를 빠르고 효율적으로 유용한 입찰 문서로 만들어준다. 매트릭스는 전반적인 맨홀 갱생 프로젝트에 대한 명확한 방법을 공사업체에게 제공했다.

하지만 파이프의 경우, 파이프를 복구할 것인지 교체할 것인지의 여부만 알면 되기 때문에 파이프에 대한 표는 필요하지 않다. 이를 위해 CCTV 검사 중 식별된 결함에 대한 개요를 제공해줄 수 있는 스프레드시트가 작성되었다. 스프레드시트는 파이프가 붕괴되었는지, 부서졌는지, 오프셋 되는지 또는 다른 결함이 있는지 나타나 있다. 각각의 파이프 마디에서 몇 개의 결함이 나타났는지도 알 수 있다. 이로 인해 심하게 노후 된 파이프를 아직은 구조적으로 안정된 파이프로부터 분리할 수 있으며 파이프에 대한 개요를 쉽게 살펴볼 수 있다.

다음 단계는 선택한 파이프 위를 걸어서 갱생시 장애물이 나타날 것인지 확인하는 것이다. 갱생 방법은 다음을 포함한 기준에 기반을 둔다.

- (a) 심각한 결함(예를 들어 파이프 부분에 20% 이상 관로 무너짐)
- (b) 관로 깊이(예를 들어, 20피트 이상 깊은 관로)
- (c) 시공 가능성(예를 들어, 집이 오픈 컷 갱생을 위한 관로에 너무 가까움)

이러한 기준으로 갱생 방법을 선택할 수 있다(오픈 컷, 세미 무굴착, 무굴착, 교체 등). 글래스스톤에는 오래된 나무가 많고 관로는 집에 가까운 경향이 있기 때문에, CIPP는 가장 전형적인 갱생 방법이다. 하지만 오픈 컷 및 관로 굴착 프로젝트도 소수 확인되었다.

3. 결론

이 연구는 글래스스톤에서 맨홀과 관로 갱생 프로젝트를 식별하고 수량을 파악하는 체계적인 방법으로 이어졌다. 이 연구는 또한 시정부가 갱생 노력의 효율성을 판단하기 위해 사용할 수 있는 기준선을 구축했다. 집수 시스템의 1차 부분에 대한 갱생과 교체 프로젝트는 2003년 8월 완료되었다.

갱생 후 우수와 유량 모니터링 프로젝트는 2003년 가을 완료되었다. 데이터의 분석에 따르면, 집수 시스템에서 완결된 갱생과 교체 프로젝트는 40% 이상의 I/I 감소로 이어졌다. 착수된 갱생 프로젝트는 집수 시스템의 구조적 무결성을 개선하고, 비상상태를 피하고 최고 강우 유출수 흐름을 감소시키게 될 것이다. ☺