

## 청계천 유역의 물순환 해석과 물순환 건전화 대안 평가



노성진 >>  
한국건설기술연구원 연구원



김현준 >>  
한국건설기술연구원 수석연구원

### 1. 서론

도시 개발에 의해 우수의 불투수지역 확대, 하천부지의 축소, 산림 및 우수지의 감소 등이 급속히 진행되어 하천유량의 변화, 지하수위의 저하, 용수의 고갈, 생태계의 파괴 등이 발생되어 왔다. 도시지역은 도시형 수해발생, 갈수시의 급수안전도 저하, 평시 하천유량의 감소, 공공수역의 수질악화, 지하수 오염 등 여러가지 문제에 직면하고 있다(雨水貯留浸透技術協會, 2000).

이러한 문제들은 서울의 경우도 예외는 아니며 청계천 복원 사업과 더불어 그동안 방치되었던 도시유역의 물순환 체계를 정상화시키는 방법 모색이 필요하

다. 청계천의 유출특성과 도시화로 인한 지하수위의 저하 등은 복원된 청계천의 수량·수질을 비롯한 하천 생태 및 도시미기후의 향상성에 불리하게 작용할 것으로 예상된다. 또한 이러한 복원 사례는 국내·외적으로 매우 드물기 때문에 공사 전은 물론 공사 중·후에도 지속적인 관찰을 통하여 계획의 조정과 유지관리계획 및 앞으로의 발전방향을 검토할 필요성이 있다.

“청계천 복원공사 모니터링 및 물순환 해석 기술 적용” 연구는 수자원의 지속적 확보 기술 개발 사업의 세부 연구과제로, 복원공사에 따른, 수문, 기상, 수질 및 생태, 지하수 등의 변화 양상 모니터링, 청계천 유역의 물순환 해석, 왜곡된 물순환 체계를 바로 잡을 수 있는 대안 등에 대한 연구를 수행 하고 있다.

본고에서는 위 연구의 수문분야 연구성과 중 모니터링 자료와 격자기반의 분포형 수문모형을 통해 청계천 유역의 물순환을 모의·분석한 결과와 왜곡된 물순환 체계에 대한 건전화 대안시설로서 침투 트렌치(Trench)의 모의 적용결과를 소개하고자 한다.

### 2. 청계천 유역개황 및 특성

청계천은 서울의 서북쪽에 위치한 인왕산과 북한산의 남쪽 기슭, 남산의 북쪽 기슭에서 시작하여 서에서 동으로 서울의 도심부를 흐르는 유로연장 13.75, 유



표면 조건, 표층도양, 하천, 지하대수층, 인공계 용수, 초기·경계 조건 등으로 나눌 수 있다. 청계천 유역을 200 × 200 의 격자로 나누고(남북방향 54개, 동서방향 54개), 유역을 15개의 소유역으로 분할하였으며 하천은 물리적 특성(경사, 단면 등)과 관측결과와의 비교지점 등을 고려하여 26개의 세부하천으로 구분하였다(그림 3). 토지이용 및 표층도양 분포는 기존 연구의 결과를 사용하였고(노성진 등 2005), 인구 분포 자료는 구청별 인구통계 자료와 토지이용정보를 이용하여 격자별 인구수를 산정하였다. 강우, 풍속, 일조시간, 기온, 상대습도 등 기상 조건에 대한 자료는 1998년부터 2002년까지의 기상청 서울 측후소 자료를 이용하였다.

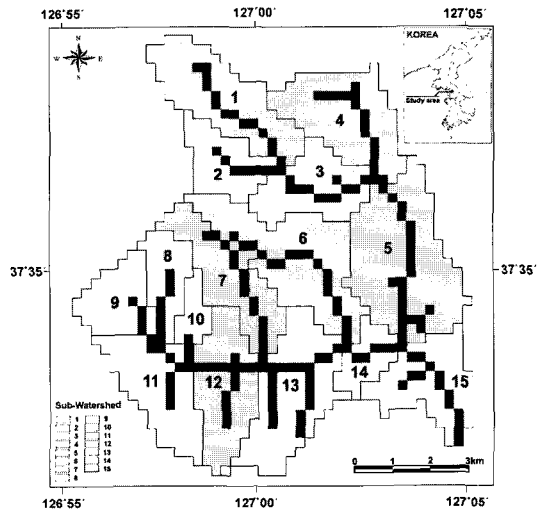


그림 3. 소유역 및 하천 격자 구성

## 2) 합류식 하수관 영향의 고려

합류식 하수관거는 우수와 하수가 함께 흐르도록 설계된 하수관망으로 대부분 도시 하천변을 따라 주관거가 설치되어 있다. 홍수기에는 관거의 계획처리량 이상의 흐름발생시 합류식 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)로 방류됨에 따른 수질 오염, 갈수기에는 침입수, 유입수에 의한 하수처리장 용량 및 처리비용 증가 등이 문제점으로 지적되어 왔다(이두진과 윤현식(2004)).

그림 4에서 보는 바와 같이 청계천 유역의 하수관거는 청계천, 정릉천, 성북천의 좌, 우안을 따라 주관거가 설치되어 있으며, 합류식이다. 유역에 대한 현장 조사 결과, 하천 상류의 소지류들은 대부분 하천으로 연결되지 못하고 합류식 하수관으로 흐름이 유입되고 있는 것으로 조사되었다(과학기술부, 2006). WEP 모형을 통해 합류식 하수관에 의한 자연유출 차단량을 정량적으로 해석하고자 유역내 자연유출은 하천으로 이어지기전에 합류식 하수관으로 전량 연결되는 것으로 가정하고 '최대 자연유출 차단량' 개념을 도입하였다.

그림 5의 합류식 하수관거내 흐름을 인공유출 요소( $Q_{cs}$ )와 자연유출 요소( $Q_N$ )로 나누어 생각할 수 있다. 인공유출 요소는 하수, 공업폐수 등이고 자연유

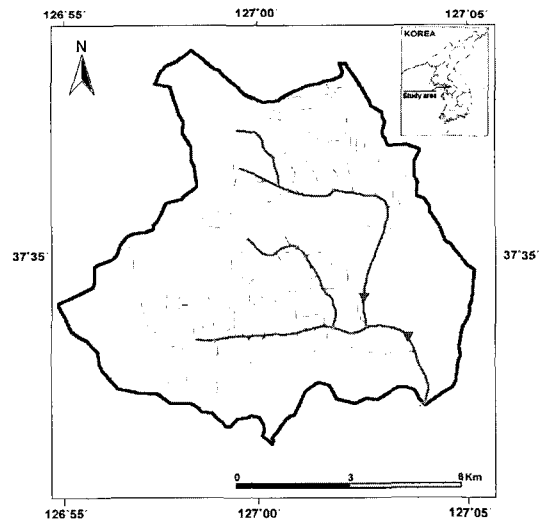


그림 4. 청계천 유역의 합류식 하수관거망

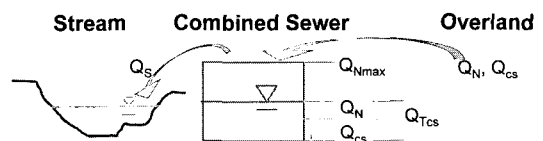


그림 5. 합류식 하수관거내 흐름 요소

출 요소는 기저유출, 중간유출, 지표면유출 등이며, 침입수나 유입수도 포괄적으로 자연적 유출 요소로 간주할 수 있을 것이다. 이 자연유출 요소는 인공적

인 교란이 없었을 경우에 하천이나 지하수로 이어졌을 양이므로, 합류식 하수관거에 의해 배제되는 자연 유출의 총량을 알게 되면 하천의 갈수량에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있다. 또한 하수관거의 계획통수능에서 인공적 요소의 유출량을 뺀 값을 하수관거의 '최대 자연유출 차단량( $Q_{Nmax}$ )' 이라 정의하였다. WEP 모형에서 하천변의 합류식 하수관거 구간별 최대 자연유출 차단량과 하천 유입량의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_r = 0, Q_{Tcs} = Q_{cs} + Q_N \quad (Q_N \leq Q_{Nmax})$$

$$Q_r = Q_N - Q_{Nmax}, Q_{Tcs} = Q_{cs} + Q_{Nmax} \quad (Q_N > Q_{Nmax})$$

여기에서  $Q_r$ : 하천유출량( $m^3/sec$ ),  $Q_{Tcs}$ : 합류식 하수관거 유출총량( $m^3/sec$ ),  $Q_{cs}$ : 하수량( $m^3/sec$ ),  $Q_N$ : 자연유출량( $m^3/sec$ ),  $Q_{Nmax}$ : 최대 자연유출 차단량( $m^3/sec$ ).

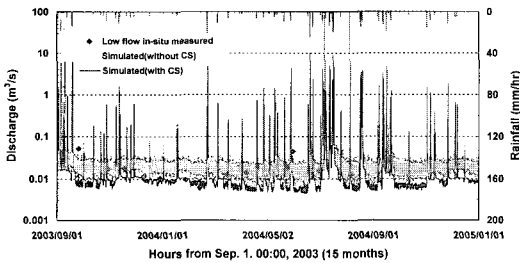
### 3) 모의 조건

표층토양의 초기 함수율과 초기 지하수위 등 초기

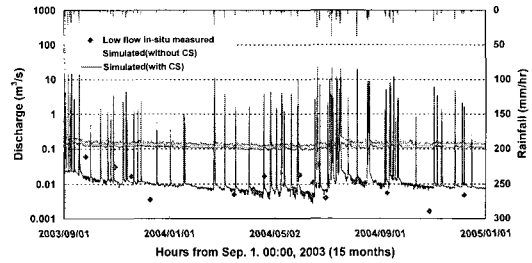
계산 시작 조건의 영향을 줄이기 위해 1998년부터 2000년까지의 기간을 모의한 후 2000년 12월 31일 24:00의 조건을 초기조건으로 2001년 1월 1일 01:00에서 2004년 12월 31일 24:00까지 4년간을 모의하였다. 이 중 2001~2002년 자료는 모형의 보정에, 2003~2004년 자료는 검증에 각각 사용하였다. 보정은 2차에 걸쳐 수행되었는데, 첫 번째는 최대 자연유출 차단량을 0으로 하고 도시지역의 불투수율, 하천의 조도계수 등의 매개변수를 홍수기 유출 자료 비교를 통해 보정하였으며, 두 번째는 다른 매개변수는 고정하고 최대 자연유출 차단량을 갈수기 실측 유출 자료를 통해 보정하였다.

### 4) 유출 모의 결과

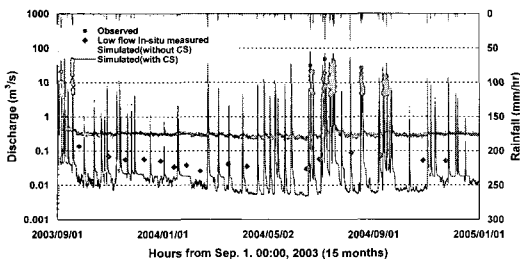
그림 6은 청계천 유역내 갈수량 측정 지점에서 최대 자연유출 차단량( $Q_{Nmax}$ ) 설정 전과 후의 유출 모의 결과를 비교한 것이다.  $Q_{Nmax}$  설정 전에는 갈수량 측정값에 비해 전반적으로 높은 유출 결과를 보이지만  $Q_{Nmax}$  설정 후에는 측정값과 비슷한 범위의 유출값을 보인다. 성북천의 보문2교와 청계천의 제2마장교 지



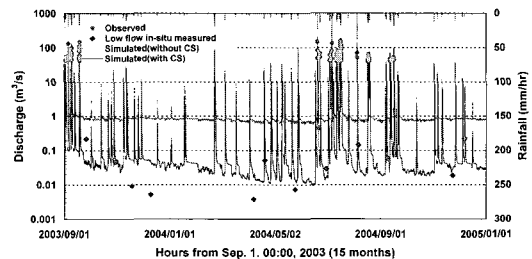
(a) 성원아파트(정릉천)



(b) 보문2교(성북천)



(c) 용두교(정릉천)



(d) 제2마장교(청계천)

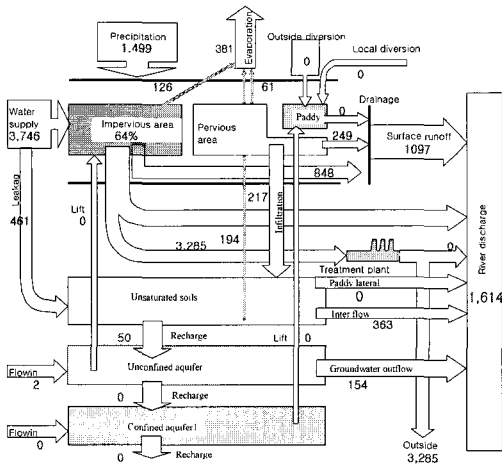
그림 6. 합류식 하수관 영향 고려한 유출 해석

점은 연중 상당기간동안 건전화 현상이 나타나는 구간인데,  $Q_{Nmax}$  설정 후 보문2교 지점은 건전화 현상을 모의할 수 있었다. 제2마장교 지점은 상류 용두교 지점의 흐름이 보와 모래하상의 영향으로 소멸되어 건전화를 보이는 구간인데 이러한 특성이 반영되지 않아 다소 높은 갈수량이 모의된 것으로 판단된다.

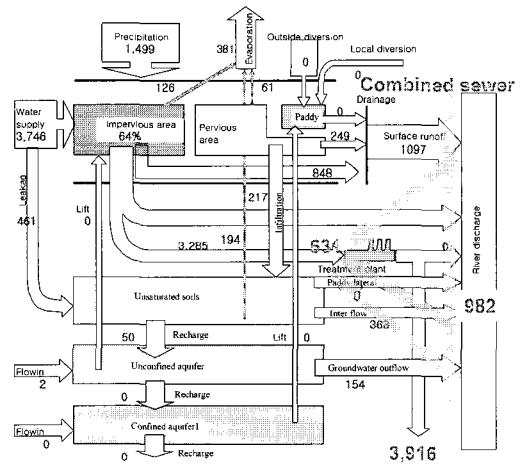
5) 물순환 모의 결과

그림 7(a)와 (b)는 각각 합류식 하수관 영향을 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우 청계천 유역

물순환 해석 결과(2004년)이다. 물순환 요소중 유입 요소는 강우 1,499mm, 상수도 공급량 3,746mm로 총 5,245mm이며 그림 7(a)와 (b)에서 동일하다. 이러한 공급에 대하여 합류식 하수관을 고려하지 않았을 때는(그림 3.1-22(a)) 상수도 공급량중 461mm가 누수되고, 나머지 3,285mm는 하수처리장으로 연결되며, 381mm가 증발산되고 1,614mm(직접유출: 1,097mm, 중간유출: 363mm, 지하수유출: 154mm)가 하천을 통해 유출된다. 반면, 합류식 하수관을 고려하였을 때는(그림 3.1-22(a)) 631mm가 합



(a) 합류식 하수관 영향 미고려시



(b) 합류식 하수관 영향 고려시

그림 7. 합류식 하수관 영향 고려 여부에 따른 물순환 해석 비교(2004)

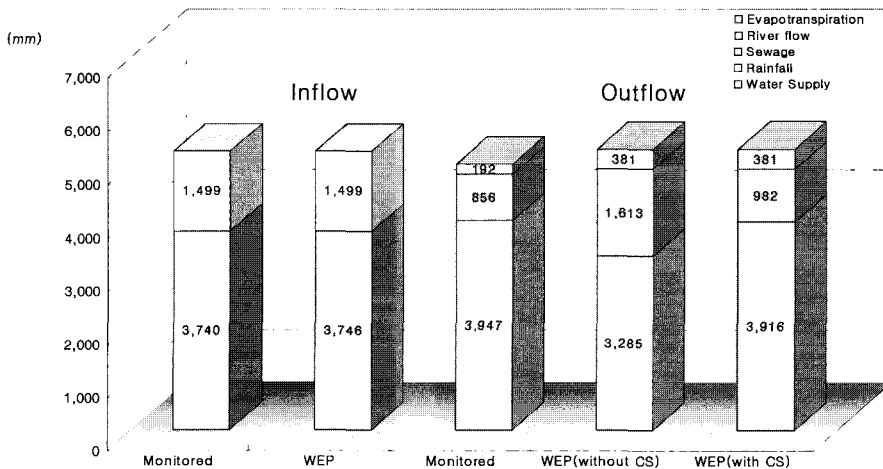


그림 8. 실측 및 모의결과의 연간 물수지 비교(2004)

류식 하수관에 의해 배제되어 하천유출량은 982mm로 39% 감소하고, 하수처리장 유입수는 3,916mm로 19% 증가하는 것으로 모의되었다.

그림 8에서 유역내 유입·유출에 대한 연간 실측 및 모의값을 비교하면 하수처리장 유입량이 실측 추정치는 3,947mm, 합류식 하수관 미고려시 모의치는 3,285mm, 합류식 하수관 고려시 모의치는 3,916mm로 합류식 하수관 영향을 고려한 모의 결과가 실측 물수지 결과에 가까운 것으로 나타났다.

### 5. 침투 트렌치 영향 평가

우수의 집중적인 유출을 억제하고 보수(保水)와 저류기능을 강화하여, 도시화로 인한 홍수 증가, 수원함양기능 저하, 수자원환경의 악화 등을 억제하는 기술을 추진하는 구체적인 시설들을 우수유출 저감시설이라 한다. 이러한 시설들은 우수를 일시적으로 저류시켜 침투유출을 줄이는 저류형과 지표면을 통해 지하로 침투시키는 침투형으로 구분된다(김갑수, 1998). 본 절에서는 침투 트렌치의 영향을 모의하여 청계천 물순환을 정상화 시키기 위한 대안으로서의 가능성을 평가하였다.

#### 1) 침투 트렌치의 모형화

침투 트렌치는 굴입한 도랑에 쇄석을 충전하고 침투통과 연결되는 침투관을 설치하여 우수를 도입, 쇄석의 측면과 저면에서 지중으로 침투시키는 시설이다.

WEP 모형에서는 다음과 같은 수식을 통해 침투 트렌치를 모의한다.

$$S_i/\partial t = Q_{in} - Q_{inf} - Q_{ovf}$$

$$S_i = nLWH$$

$$Q_{inf} = K_0L(aH + b)$$

$$Q_{ovf} = cL(H - H_m)^{3/2}$$

여기서,  $S_i$ 는 침투 트렌치의 저류량이고,  $Q_{in}$ 는 유

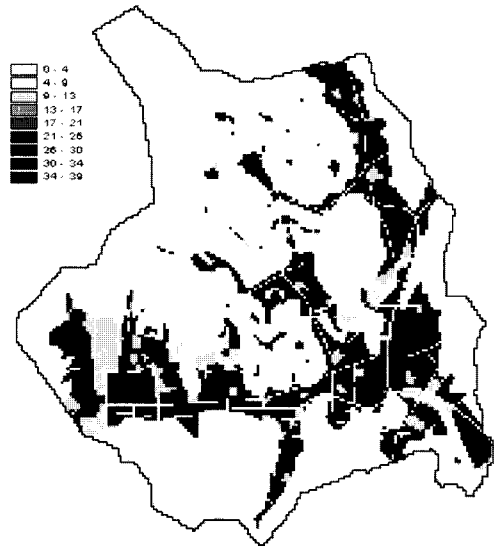


그림 9. 침투 트렌치 설치 가능 지역 및 격자별 트렌치 길이

입량,  $Q_{in}$ 는 침투량,  $Q_{ovf}$ 는 유출량,  $n$ 은 침투 트렌치 내의 공극률,  $L$ 은 침투 트렌치의 길이,  $W$ 는 너비,  $H$ 는 깊이,  $H_m$ 은 최대 설계 깊이,  $K_0$ 는 트렌치 아래 토양의 포화투수계수이고,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 상수이다.

WEP 모형에 의하면 침투 트렌치의 설치 기준은 다음과 같다.

- ① 경사도 10% 미만인 지역
- ② 토양이 점토(Clay)가 아닌 지역
- ③ 침투 트렌치의 밀도가 450m/ha를 넘지 않을 것
- ④ 설치지역 지하수위가 지표면으로부터 2m 이하에 있을 것

위의 기준에 따라 청계천 유역에 침투 트렌치가 설치 가능한 지역을 계산하면 그림 9와 같다. 유역내부의 국부적 특성을 보다 정확히 반영하기 위하여 침투 트렌치 모의시에는 유역을 50 격자로 분할하여 모의하였다. 그림에서 침투 트렌치 밀도는 50 격자당 설치 가능한 침투 트렌치의 길이를 나타낸다.

#### 2) 침투 트렌치의 물순환 개선 효과

그림 10의 홍수기 유출 수문 곡선에서 보듯이 침투

트렌치 설치시 침투 홍수량 등 홍수 저감 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 반면에 그림 11에서 2002년에 대한 물순환 해석 결과를 살펴보면, 침투 트렌치 설치시 연간 인공 침투량이 73 증가하여, 중간유출 및 지하수 유출이 각각 55, 22 증가하는 것으로 나타났으며, 지표면 유출은 74 감소하였다. 전체적으로 홍수량이 줄고 갈수량이 늘어 일부 물순환 개선 효과가 있으나, 갈수량 증가량이 대부분 합류식 하수관에 의해 배제되어 하천 유량이 오히려 줄어드는 것으로 모의되었다. 이는 침투 트렌치 설치로 인한 물

순환 개선을 위해서는 합류식 하수관 시설의 재정비 등 유역내 저류량이 하천으로 이어질 수 있도록 하는 노력이 선행되어야 함을 의미한다.

## 6. 요약 및 결론

물리적 이론에 근거한 격자 기반의 분포형 강우-유출 모형인 WEP 모형을 이용하여 청계천 유역에 대한 정밀한 물순환 해석을 수행하고 물순환 개선을

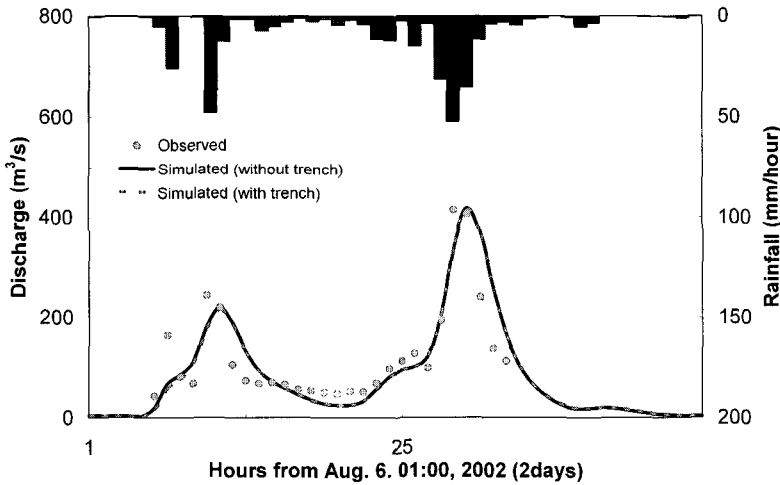


그림 10. 홍수기 유출 수문 곡선

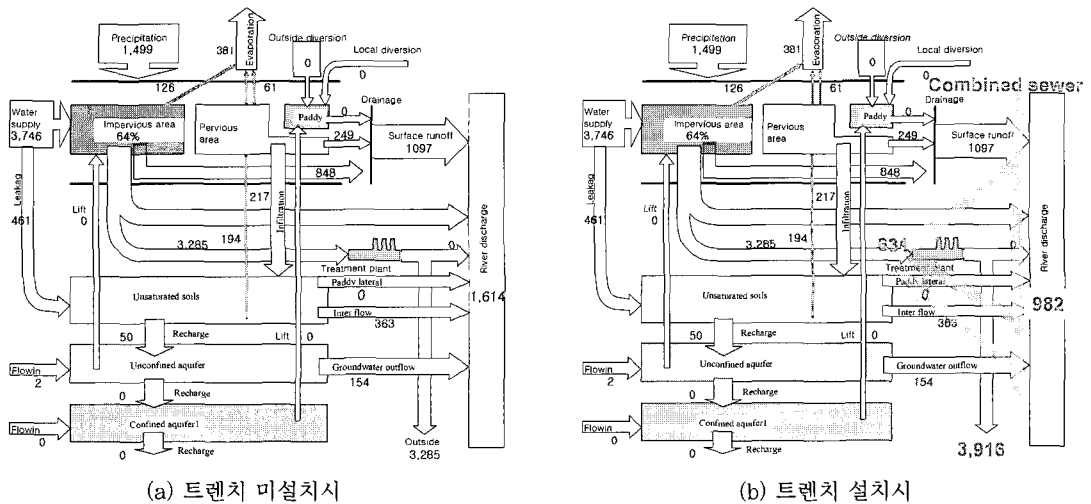


그림 11. 침투 트렌치 설치로 인한 물순환 변화 (2002)

위한 대안을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① WEP 모형을 이용하여 청계천 유역을 200 격자로 구분하여 각 격자에 대한 수평, 수직의 3차원 물순환 해석하였다. WEP 모형의 해석 결과를 실측자료와 비교하여 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 도심유역의 정밀한 물순환 해석에 활용성이 높은 것으로 평가되었다.
- ② 청계천 유역은 본류와 지류에 합류식 하수관이 매설되어 있는데, 평상시 하천유출의 대부분이 합류식 하수관을 통하여 흐르게 되며, 이를 모형에서 재현하도록 하였다. 모의 결과 합류식 하수관을 고려하지 않은 경우보다 관측 유출량에 더 적합한 것으로 분석되었다.
- ③ 청계천 유역에 침투 트렌치 설치시 영향을 평가하였다. 침투 트렌치는 홍수 저감 보다는 물순환 개선에 효과가 있으나, 갈수량 증가량이 대부분 합류식 하수관에 의해 배제되는 것으로 모의되었다. 물순환 개선을 위해서는 침투 트렌치 설치에 앞서 합류식 하수관 시설의 재정비 등 유역내 저류량이 하천으로 이어질 수 있도록 하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

※ 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 2-6-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 과학기술부 (2006). 수자원의 지속적 확보기술개발사업-청계천 복원공사 모니터링 및 물순환 해석 기술 적용(과제번호 2-6-2), 한국건설기술연구원.
2. 김갑수 (1998). 우수유출 저감시설 기준연구, 서울시정개발연구원
3. 김현준, 장철희, 노성진, 김동필, 정일문, 홍일표 (2004).

“청계천 유역의 수문 모니터링 및 물순환 해석.” 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄 자료집, 한국건설기술연구원, pp. 3-22.

4. 노성진, 김현준, 장철희 (2005). “청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 38권, 제 8호, pp. 645-653.
5. 서울특별시 (2004). 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구 (최종보고서), 서울특별시.
6. 이두진, 윤현식 (2004). “건기 침입수/유입수 저감에 따른 CSOs오염부하 삭감효과 예측.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 24권, 제 3B호, pp. 273-280.
7. Jia, Y. (2004). “3차원 유역 물순환 해석을 위한 WEP 모형의 적용.” 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄 자료집, 한국건설기술연구원, pp. 25-37.
8. Jia, Y., (1997). Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model, Ph. D., dissertation, University of Tokyo, Japan.
9. Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y. and Suetsugi, T. (2001). “Simulation of hydrological cycle in an urbanized watershed and effect evaluation of infiltration facilities with WEP MODEL.” Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 19, No.1, pp. 43-52.
10. Kinouchi, T., and Jia, Y., (2003). “WEP Model의 개발과 적용.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 48-58.
11. Ni, G., Jia, Y., Kinouchi, T., Tojima, K., Yoshitani, J., Suetsugi, T. and Kawahara, Y. (2001). “Field observation and simulation of groundwater level changes due to urbanization in the Yata River basin, Japan.” Proc. of a symposium held during the 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands, IAHS Publ. No.269, pp. 139-142.
12. 雨水貯留浸透技術協會 (2000). 都市域における水循環系の定量化手法—水循環系の再生に向けて—.
13. 土木研究所 (2002). WEP モデル 解説書.