

# 지하철 노선, 지하수 양수량 및 상수도 누수량을 고려한 청계천 유역 물순환 해석

## Hydrologic Cycle Analysis of Cheonggye-cheon Watershed Considering Subway, Groundwater Pumping and Leakage Effects

노성진\*, 김현준\*\*, 장철희\*\*\*

Seong Jin Noh, Hyeon Jun Kim, Cheol Hee Jang

### 요 지

본 연구에서는 지하철 노선, 지하수 양수량 및 상수도 누수량 등 도시유역에서 물순환에 큰 영향을 미치는 인공적 요소들을 분포형 수문모형에 반영하여 물순환을 모의하였다. 분포형 수문모형으로는 일본토목연구소에서 개발된 WEP 모형을 사용하였다. 입력자료 구축시 지하철 노선을 따라서 제1투수층, 제1난투수층, 제2투수층의 투수계수를 낮게 설정하여 지하철 노선의 영향을 반영하였으며, 지하철역 및 구별 지하수 양수량, 상수도 누수량을 모형의 입력자료로 구축하였다. 모의결과를 서울시 지하수관측공의 실측 자료와 비교하여 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 유역 스케일에서의 지하수위 분포양상을 모의할 수 있었다. 지하철 노선, 지하수 양수량, 상수도 누수량 등을 고려, 미고려시를 별도로 모의하여 각각 요소가 물순환에 미치는 개별적 종합적 영향에 대해 평가하였다.

**핵심용어 : 분포형 수문모형, WEP 모형, 지하철 노선, 지하수 양수량, 상수도 누수량**

### 1. 서론

서울시내 지하철 구간의 평균 깊이는 제1기(1~4호선)의 경우 13.7m, 제2기(5~8호선)의 경우 22.6m로, 2기 지하철 148개역 중 39%에 달하는 57개역이 평균 깊이를 넘고 있는 것으로 알려져 있다(국민일보, 2003). 청계천 유역은 6개의 지하철 노선이 서로 거미줄처럼 얽혀있는 서울의 중심부를 포함하므로 유역단위의 지하수 유동 해석을 위해서는 지하철 영향에 대한 반영이 필요하다. 지하철 영향은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 지하철 구조물이 불투수층으로 작용하는 것이고 다른 하나는 지하철역의 지하수 양수이다. 본 연구에서는 지하철 노선과 지하철 역사에서 강제로 배제하는 지하수 양수량의 영향을 평가하고, WEP 모형에서 모의되는 지하수위와 서울시에서 관측한 지하수 관측정의 값을 비교하였으며, 모의 결과가 관측값의 변화 양상과 비슷하게 모의됨을 확인하였다.

도시지역의 인공적 요소중 물순환에 영향을 주는 중요한 요소는 지하철 영향 이외에 누수량을 들 수 있다. 청계천 유역은 고도로 도시화된 지역으로 연간 상수도 공급량이 3,700mm 이상이어서 누수량도 450mm 이상으로 추정된다. 이 상수도 누수량은 강우에 의한 침투량보다 많은 양으로 지하수 유동 해석에 큰 영향을 줄 것으로 판단되며, 해석시 상수도 누수량 고려시와 미고려시로 나누어 모의하고 결과를 비교하였다.

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [sjnoh@kict.re.kr](mailto:sjnoh@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [chjang@kict.re.kr](mailto:chjang@kict.re.kr)

## 2. 모형의 개요

WEP 모형은 일본의 토목연구소, 과학기술진흥사업단, Jia 등이 공동으로 개발한 물리적인 기반의 공간 분포형 모형(Physically Based Spatially Distributed)이다. WEP 모형은 격자 기반 모형으로 유역을 평면 격자로 분할하여 각각의 격자를 계산단위로 하며, 연직방향으로 표층, 과도층, 지하대수층으로 나누어진다. 수평방향으로 표면류와 하도류는 각각 1차원 운동과 기법으로 추적되고 지하수 흐름은 각 층간의 함양, 침투, 양수량 등을 고려하여 2차원 해석을 하며, 이때 지표면, 하도와의 물 교환을 고려한다. 토지이용은 크게 수역, 나지-식생역, 불투수역 등의 세가지로 분류되며, 각 요소별로 다시 세부 분할된다. 증발산은 식생 등의 차단을 고려하여 Penman 식으로 계산되며, 침투는 Green-Ampt 모형을 다층 토양에 대해서 적용 가능하도록 수정한 “Generalized Green-Ampt 모형”을 이용하여 계산한다(土木研究所, 2002).

## 3. 대상유역 및 입력자료 구축

### 3.1 대상유역

청계천은 서울의 서북쪽에 위치한 인왕산과 북한산의 남쪽 기슭, 남산의 북쪽 기슭에서 시작하여 서에서 동으로 서울의 도심부를 흐르는 유로연장 13.75 km, 유역 면적 50.96 km<sup>2</sup>의 도시하천이다. 지천으로 성북천과 정릉천을 포함하며 하상경사는 1/310 ~ 1/510 정도이다. 유역의 평균고도는 El. 70.1 m이며, 유역의 평균 경사는 7% 정도이다. 토양은 사질토 1.0%, 암석 4.0%, 미사질양토 25.3%, 미사질식양토 33.0%, 식양질토 35.9%, 식토 0.9%로 대부분이 양토(Loam)로 이루어져 있으며, 토지이용은 산림지역이 23.2%, 도시지역이 75.9%를 차지하고 있다. 유역내 행정구역은 강북구, 동대문구, 성동구, 성북구, 종로구, 중구의 총 6개구 86개동이고 유역내 인구는 120만명에 달한다(서울특별시, 2004).

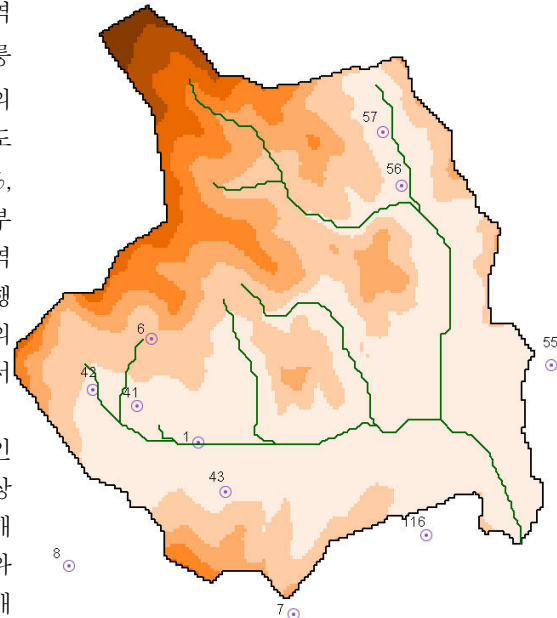


그림 1. 청계천 유역의 경계 및 지하수 모니터링 관정 위치

청계천 유역내 수위 관측소는 청계천과 정릉천 하류부인 제2마장교와 용두교에 각각 설치되어 있으며 우량 및 기상 관측시설은 기상청에서 관리하고 있는 서울 측후소 및 6개의 자동기상관측소(AWS; Automatic Weather System)와 각 지자체(구청 6개소, 동사무소 2개소) 및 빗물펌프장(2개소) 등 12개소의 우량 및 기상 관측소가 있다(과학기술부, 2006). 서울시에서 관리하는 지하수위 모니터링 관정중 유역내 위치한 모니터링 관정수는 6개로, 위치는 그림 1에서 보는 바와 같다.

### 3.2 입력자료 구축

WEP 모형의 입력 자료를 그 특성에 따라 분류하면 대상유역(유역분할, 인구분포 등), 기상 조건, 지표면 조건, 표층토양, 하천, 지하대수층, 인공계 용수, 초기경계 조건 등으로 나눌 수 있다. 청계천 유역을 50 m × 50 m의 격자로 나누고(남북방향 199개, 동서방향 179개), 유역을 15개의 소유역으로 분할하였으며 하천은 물리적 특성(경사, 단면 등)과 관측결과와의 비교지점 등을 고려하여 26개의 세부하천으로 구분하였다(그림 3). 토지이용 및 표층토양 분포는 기존 연구의 결과를 사용하였고(노성진 등 2005), 강우, 풍속, 일조시간, 기온, 상대습도 등 기상 조건에 대한 자료는 1998년부터 2004년까지의 기상청 서울 측후소 자료를 이용하였다.

### 3.2.1 지하철 노선 및 지하수 양수량 반영

지하대수층에 대한 매개변수는 표 1에서 보는 바와 같다. 이 중 제1대수층의 깊이 자료는 2단계 1차년도 연구시 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)의 시추자료를 토대로 구축하였다.

청계천 유역 내에는 그림 2에서 보듯이 6개의 지하철 노선이 복잡하게 얽혀있다. 지하철 노선의 영향을 모형에 반영하기 위해 노선이 위치한 격자의 제1투수층, 제1난투수층, 제2투수층 투수계수를 낮게 설정하여 지하철 노선의 영향을 반영하였다.

그림 3의 그래프는 유역 내의 지하철 역에서 일일 평균 양수되는 지하수의 양을 도시한 것이다. 모형에는 일일 양수량을 시간별 양수량으로 전환하여 적용하였으며, 지하철 역이 위치한 격자에서 양수되도록 하였다.

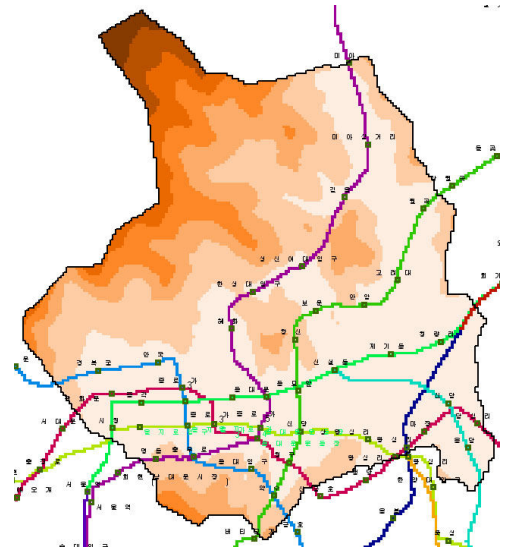


그림 2. 유역내 지하철 노선

표 1. 지하대수층 매개변수

구분	제1투수층		제1난투수층		제2투수층		제2난투수층	제3투수층
	지하철노선의외	지하철노선	지하철노선의외	지하철노선	지하철노선의외	지하철노선		
투수계수 (m/s)	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-10}$	$5.0 \times 10^{-8}$	$5.0 \times 10^{-14}$	$5.0 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-14}$	$2.0 \times 10^{-9}$	$5.0 \times 10^{-8}$
비산출율	$1.0 \times 10^{-4}$		-		-		-	-
비저류계수 (1/m)	-		-		$4.0 \times 10^{-4}$		-	$4.0 \times 10^{-4}$
깊이(m)	5.0 ~ 35.0		20.0 ~ 500.0		20.0 ~ 140.0		20.0	100.0

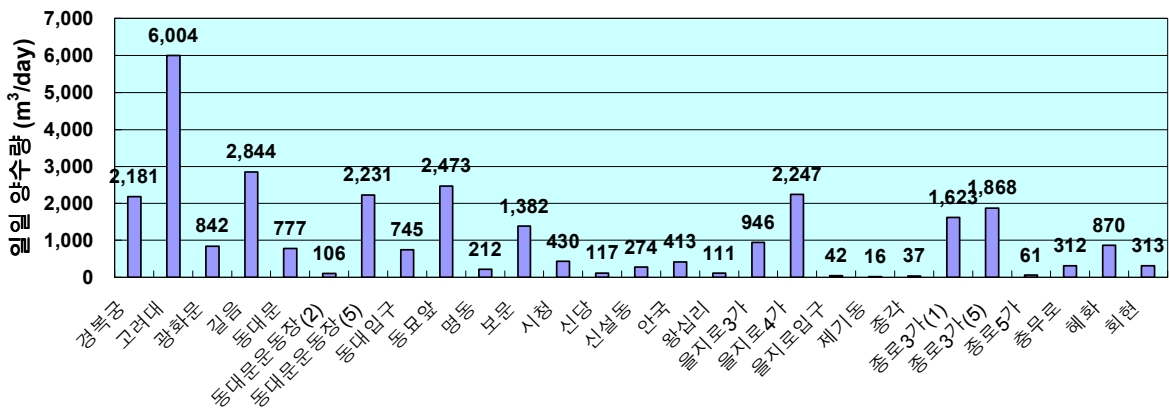


그림 3. 지하철 역별 일일 지하수 양수량

### 3.2.2 상수도 누수량 반영

상수도 누수량은 격자별로 모형에 반영되며, 다음의 식으로 계산된다.

$$\text{상수도 누수량} = \text{격자별 인구} \times 378.6 \text{ lpcd}(\text{상수도 공급량}) \times 365 \text{ day} \times 12.3\%(\text{누수율}) \quad (\text{식 1})$$

이 중 인구분포 자료는 구정별 인구통계 자료와 토지이용정보를 이용하여 격자별 인구수를 산정하였고, 상수도 공

급량은 관할 상수도 사업본부의 공급량을 기준으로 하였고, 누수율은 2002년 서울시에 대한 통계(환경부, 2003)를 적용하였다. 모형에 적용된 격자별 인구분포는 다음의 그림 4와 같으며, 위의 식 1을 통해 모형 계산에 반영되는 누수량의 연간 깊이(mm)를 계산하면 다음의 그림 5와 같다.

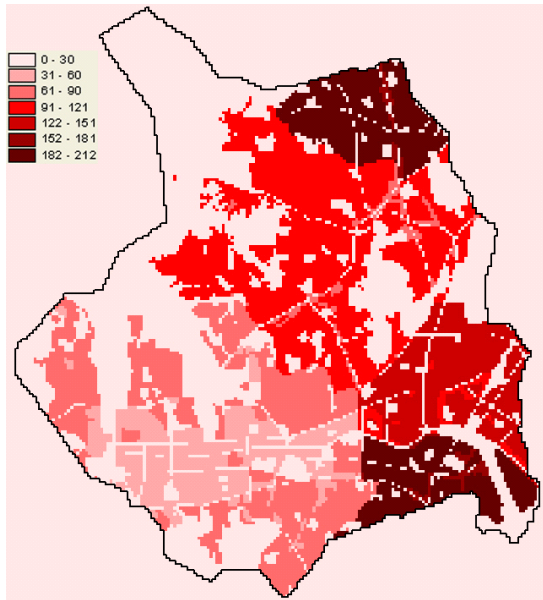


그림 4. 격자별 인구분포

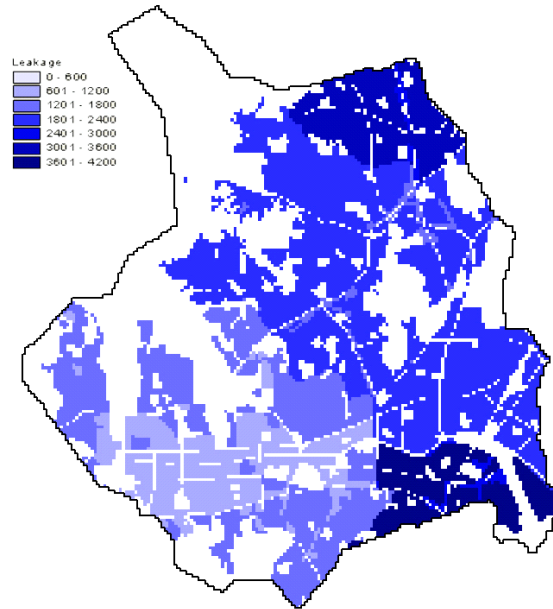


그림 5. 격자별 상수도 누수량

#### 4. 모형의 적용 결과

##### 4.1 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 검정에 각각 사용하였다. 모형의 보정 및 검정은 제2마장교와 용두교 수위관측소 지점의 유량자료를 이용하였으며, 이에 대해서는 기존 연구(노성진 등, 2005)에서 다루었으므로, 본 고에서는 생략한다.

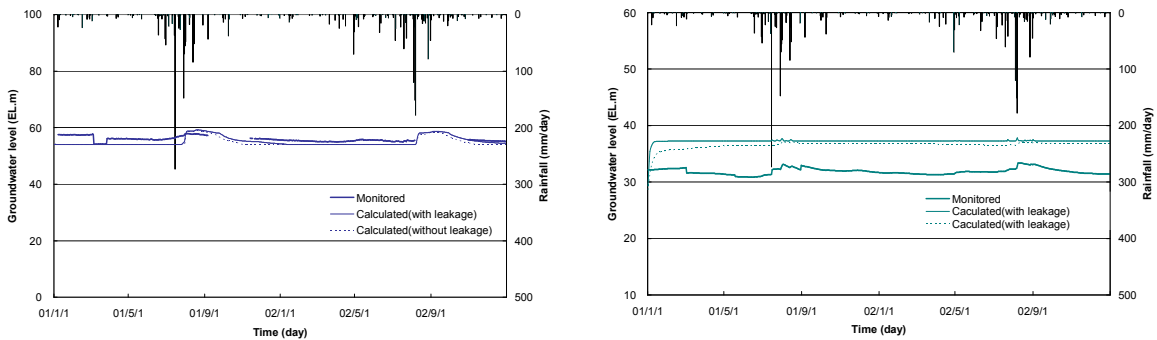
##### 4.2 지하수위 모의 결과

그림 6은 관측 및 모의 지하수위를 비교한 것으로 그림 6(a)는 삼청공원, 6(b)는 정부문서보관소 지점에 대한 비교 결과이다. 그림 6(a)에서 삼청공원 지점의 관측 지하수위(해발고도)는 갈수기시 54~56m 정도를 유지하다가 홍수기시 약 58m까지 상승하였다가 하강하는 패턴을 보인다. 삼청공원 지점의 모의 지하수위는 갈수기시 약 54m 정도로 유지되어 관측치에 가깝게 모의되고 있으며, 홍수기시 58~59m까지 상승하였다가 갈수기시의 수위를 회복하는 패턴 또한 유사하게 모의되고 있다. 다만 홍수기시 상승 높기와 상승률이 관측치에 비해 모의결과가 높았으며, 이에 대해 지하대수층 관련 매개변수의 일부 보정이 요구된다. 그림 6(b)에서 정부문서보관소 지점의 지하수위를 비교하여 살펴보면, 관측치에 비해 모의결과가 갈수기시 지하수위가 5~6m 높고, 홍수기시 지하수위 상승폭 차이가 있지만 전반적인 지하수위 패턴은 관측과 모의결과가 비슷함을 알 수 있다.

청계천 유역은 고도로 도시화된 지역으로 연간 상수도 공급량이 3,700mm 이상이어서 누수량도 450mm 이상으로 추정된다. 이 상수도 누수량은 강우에 의한 침투량보다 많은 양으로 지하수 유동 해석에 큰 영향을 줄 것으로 판단되며, 해석시 상수도 누수량 고려시와 미고려시로 나누어 모의하고 결과를 비교하였다. 그림

6(a)에서 삼청공원은 상류의 상수도 공급량이 거의 없는 지점으로 지하수위에 미치는 영향이 거의 없었으며, 그림 6(b)의 정부문서보관소는 도시지역에 위치한 지점으로, 상수도 누수량의 고려 여부에 따라 지하수위 차이가 삼청공원 지점에 비해 크게 나타났다.

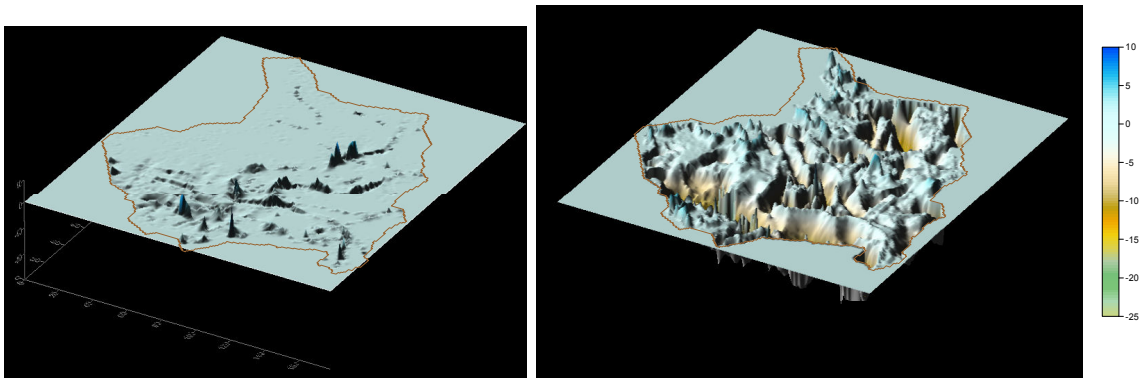
그림 7은 특정요소를 제외하고 모의하였을 경우와 지하수 노선, 지하수 양수량, 상수도 누수량 등 세가지 요소를 모두 고려하여 모의하였을 경우의 지하수위 차이를 격자별로 도시한 것으로, 그림에서 음(-)의 값이던 지하수위가 하강한 것이다. 그림 7(a)는 지하철 노선, 지하수 양수량을 고려하지 않았을 때의 지하수위 변동을 보여주며, 세가지 요소를 모두 고려하였을 때에 비해 전반적인 지하수위의 변동은 없는 것으로 나타났다. 국부적으로는 지하철 노선이 교차하는 도심부 부근의 지하수위가 더 낮아졌음을 알 수 있다. 그림 7(b)는 상수도 누수량 고려 여부에 따른 지하수위 차이를 나타낸 것으로 누수량을 고려하지 않으면 인구 밀집지역을 중심으로 지하수위 하강이 크게 모의되었다.



(a) 삼청공원

(b) 정부문서보관소

그림 6. 관측 및 모의 지하수위 비교



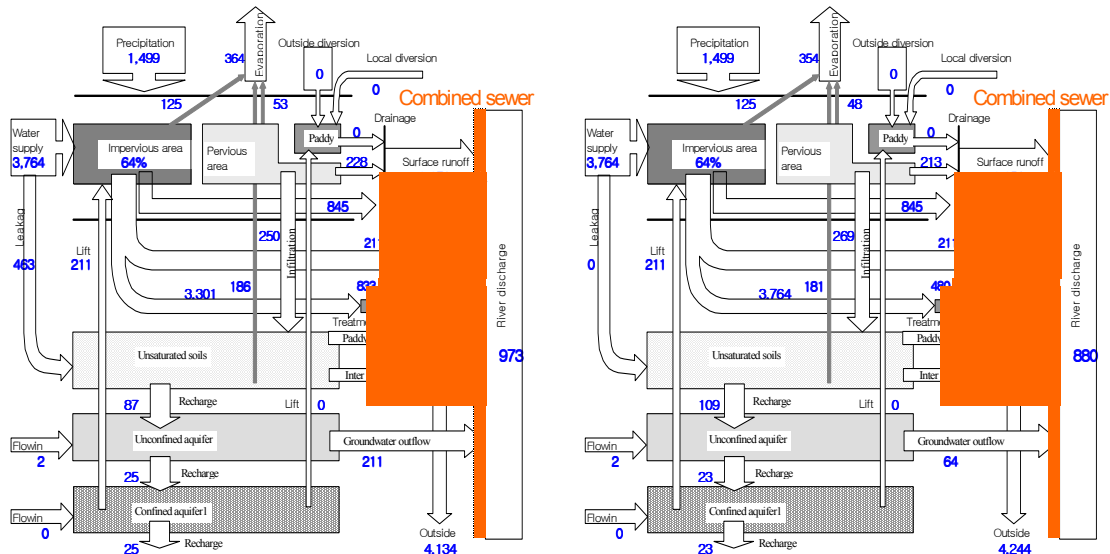
(a) 지하철, 양수량 미고려시

(b) 상수도 누수량 미고려시

그림 7. 지하수위 차이 분포도

#### 4.3 연간 물순환 모의 결과

그림 8은 지하철 노선, 지하수 양수량, 상수도 누수량 등 세가지 요소의 영향을 모두 고려하였을 경우(그림 8(a))와 누수량을 고려하지 않았을 경우(그림 8(b))의 연간 물순환 모의 결과를 비교한 것이다. 상수도 누수량을 고려하지 않았을 경우, 중간 유출이 309mm에서 25mm로 284mm 줄고, 지하수 유출이 211mm에서 64mm로 147mm 줄었다.



(a) 지하철 영향, 누수량 고려시

(b) 지하철 영향 고려, 누수량 미고려

그림 8. 물순환 해석 결과(2004)

## 5. 결론

지하철 노선과 지하철 역사에서 강제로 배제하는 지하수 양수량의 영향을 평가하였다. WEP 모형에서 모의되는 지하수위와 서울시에서 관측한 지하수 관측정의 값을 비교하였으며, 모의 결과가 관측값의 변화양상과 비슷하게 모의됨을 확인하였다. 상수도 누수량이 지하수위에 미치는 영향도 평가하였으며, 청계천 유역의 지하수위에 큰 영향을 미치고 있으며, 물순환 요소 중 중간유출과 지하수유출 요소에 큰 영향을 주고 있는 것으로 모의되었다.

## 감사의 글

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

WEP 모형의 적용에 있어서 기술지원을 한 일본 토목연구소와 Jia 박사에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 과학기술부(2006). 수자원의 지속적 확보기술개발사업-청계천 복원공사 모니터링 및 물순환 해석(과제번호 2-6-2). 한국건설기술연구원.
- 국민일보, 2003. 노후지하철 안전한가(2003.2.23, 김찬희기자)
- 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.
- 노성진, 김현준, 장철희 (2005). “청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 38권, 제 8호, pp. 645-653.
- 서울특별시(2004). 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구(최종보고서), 서울특별시.
- 환경부(2003). 2002년 상수도 통계, 환경부.
- 土木研究所(2002). WEP 모델 解説書. 土木研究所, pp. 3-22.