학술기사

WEP Model의 개발과 적용

Development and Application of WEP Model

木内 豪(Tsuyoshi Kinouchi) | 선임연구원, 일본토목연구소 수공연구그룹 수리수문연구팀 / kinouchi@pwri.go.jp
賈 仰文(Yangwen Jia) | 중국수리수전과학연구원 수자원연구소 / jiayw@iwhr.com

1. 서론

유역의 도시화가 미치는 치수, 이수 및 환경에서의 영향을 보전하고 회복하기 위해서 유역의 물순환계의 건전화 혹은 유역 수자원관리라는 개념 아래, 여러 유역에 대한 물순환 재생을 위한 계획을 수립하게 되었다. 본 고에서는 물순환의 재생이나 보전에 필수적인 유역 물순환의 정량화와 유역변화의 영향예측에 이용할 목적으로 토목연구소에서 개발한 분포형 모델인 'WEP 모델' 의 개요와 실제 유역에 적용한 사례에 대해서 소개하고자 한다. 아울러, 향후 도시화나 우수의 저류침투대책 실시 등이 유역의 물순환에 미치는 영향에 대한 모의 결과를 소개한다.

2. WEP 모델의 소개

2.1 개요

유역의 도시화에 의해 불투수 지역의 증가나 산림 및 논의 감소 등이 급속하게 진행되어 하천 유출량의 감소, 지하수위의 저하, 용수의 고갈 또는 도시지역의 기온상승 등 많은 문제가 급격하게 발생하고 있다. 또한, 도시에서의 생활을 지원하기 위한 각종 상하수도 및 배수시설이 정비되어 인공적인 물순환의 비중이 커지고 있다. 따라서, 도시하천 유역의 물순환을 해석할 경우에는 자연계와 아울러 인공계의 물이나 열순환 프로세스도 고려해야 한다. WEP(Water and Energy Transfer Process)모델은 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 일본토목연구소에 의해 개발된 분포형 물리모형이다. 본 모델의 원형은 Jia 등(1998)에 의해서 만들어졌으며, 계속적으로 지하수의 유동계산, 지표수의 추적계산, 침수시설 및 조절지 효과의 계산 및 농지의 상세 계산 등에 대한 기능이 추가되었다. WEP 모델의 입력 자료는 유역의 지형, 지질, 기상조건 등이며, 침수, 증발산, 하천으로의 표면유출, 지하수유출, 지하수의 유동 등에 대한 시공간 분포를 유역 스케일에서 모의할 수 있다. WEP 모델에 의해서 유역의 물순환계를 구성하는 강수, 지표수, 토양수, 지하수 및 하천수 등의 상호 관계나 인간활동에 따른 인공계의 물의 흐름도 시공간적으로 파악할 수 있다.

2.2 물순환계에 대한 각 프로세스의 모델화

WEP모델에서 고려하고 있는 유역 스케일의 물이동 및 열이동 프로세스를 그림 1과 2에 나타냈다. 본 장에서는 WEP모델에서 고려하고 있는 각 프로세스와 프로세스별 개요를 설명한다. 또한, 모델의 자세한 내용은 Jia 등(2001, 2002)에 기술되어 있다.

1) 증발산

격자 내의 증발산은 식생 canopy의 젖은 엽면(강우차단), 수역[1], 토양, 도시 지표면, 도시 canopy 등으로부터의 증발 및 식생 canopy의 건조한 엽면으로부터의 증산 등으로 구성되어 있다. 증발과 증산은 각각 Penman법과 Penman-Monteith법에 의해서 계산되며, 격자의 평균 증발산은 토지이용별로 산출되는 증발산에 면적 점유율을 곱하여 계산한다.

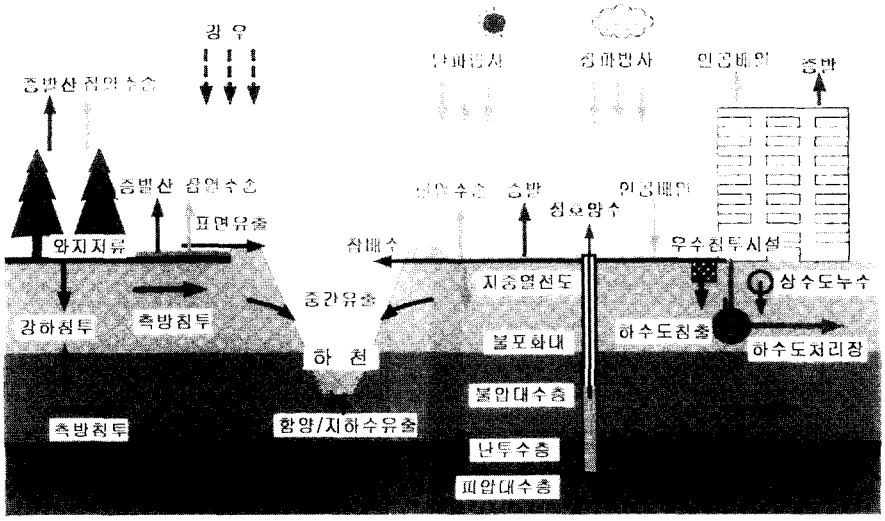


그림 1. 도시하천 유역에 있어서의 물이동 및 열이동 현상

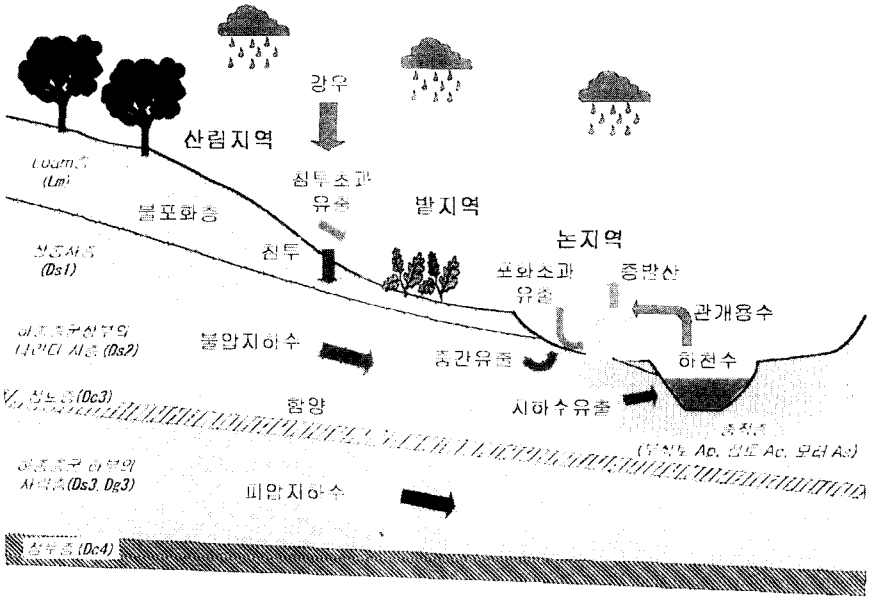


그림 2. 농지유역에 있어서의 물순환

1) 수역(水域)은 watershed를 나타내는 것임(편집자 주)

2) 침투

토양의 침투능력은 토양의 투수성과 수분량 혹은 흡인압에 따라 좌우된다. 강우강도가 토양의 포화투수계수보다 큰 경우에는 다층 토양에 있어서 침투에 적용할 수 있는 Green-Ampt 모델을 적용했다. 그 이외의 경우에는 불포화층을 세 개의 층으로 나누고, Darcy 공식과 연속식을 이용한 연직침투의 계산을 실시하였다.

3) 표면유출

수역으로의 표면유출량은 강우량과 같다고 가정했다. 또한, 불투수지역에서의 표면 유출량은 와지저류량[2]을 초과하는 강우에 대해서만 고려했다. 나대지나 식생지역에서의 표면 유출은 다음과 같은 두 가지 형태로 분류하여 계산하였다.

(1) 침투초과유출(Horton 형태)

침투초과유출은 강우강도가 토양의 포화투수계수보다 큰 경우에 발생할 수 있다. 이때, 표면유출은 강우량 가운데 일반화된 Green-Ampt 모델로 계산되는 침투량과 와지저류량의 합계를 초과하는 양으로 하였다.

(2) 포화초과유출(Dunne 형태)

불압지하수가 표층토양까지 상승한 상태로 강우가 계속되어 토양이 포화상태에 이르면 표면유출이 발생한다. 이 경우 표면유출량은 와지저류량 및 3개 표층 토양층의 물수지 방정식으로부터 구한다.

4) 중간유출

중간유출은 저지의 불압지하수 유출과 불포화 토양층으로부터 하천으로의 유출을 포함한다. 전자는 계산된 불압지하수위와 지표면 표고의 비교에 의해서 구하며, 후자는 하천 양안의 불포화 토양층의 투수계수 및 지형경사로부터 계산한다.

5) 지하수 흐름 및 지하수유출

지하수 흐름은 자유수면을 가진 지하수와 피압지하수로 나누어지며, 준일정류(semi-uniform flow)의 가정을 이용하여 수식화하였다. 또한, 피압대수층은 유역의 지질조건에 따라 여러 개의 층으로 나누어진다. 각 대수층에 있어서 계산 격자마다 상부로부터의 함양, 하부로의 침투, 정호양수 등을 고려하였다. 또한, 하천이 존재하는 격자에 대한 자유수면을 가진 대수층의 흐름 해석에서는 하천과 지하수 사이의 수위, 하상토양의 투수계수, 하상의 토양 두께 등에 적절한 양의 물의 이동을 고려하였다.

6) 인공계의 물순환과정

(1) 상수도

유역 내에서 사용수량의 실적에 근거한 용수량의 원단위를 정한다. 여기에 격자내의 인구를 곱하여 격자 용수량을 추정한다. 상수도 누수량은 용수량과 누수율로부터 계산한다.

(2) 하수와 잡배수(주방, 세탁 및 목욕 등에 의한 배수량)

격자 내의 용수량에 하수도 정비지역의 면적율을 곱한 양이 하수도로 배출되며, 나머지 양을 하천으로 유입되는 잡배수로 고려하였다.

(3) 농업용수

하천으로부터 취수되는 농업용수량은 실적 자료에 근거하여 일용수량 원단위와 일별 변동, 논면적, 관개기간 등의 정보에 근거하여 계산하였다.

(4) 지하수 양수량

지하수 양수량은 상수용과 관개용 등 두 가지가 포함된다. 상수용의 양수량은 1인당 양수량 원단위와 인구분포를 이용하여 계산한다. 격자 내의 관개용 양수량은 양수량 원단위와 논 면적, 관개기간 등에 근거하여 계산한다.

(5) 유출억제시설

우수침투 트렌치(trench), 방재조절지 및 투수성 포장 등 유출억제시설의 기능은 각 시설의 수리특성에 적합하게 모델화하였다.

2) 와지(窪地)저류량은 웅덩이 등에 일시적으로 저류되는 양을 일컬음(편집자 주)

7) 표면류 및 하도 내의 흐름

수치표고자료를 이용하여 8방향의 흐름선을 작성하고, Manning의 평균유속공식을 이용한 kinematic wave식에 의해서 표면류의 추적계산을 실시했다. 하도 내의 흐름은 하천에 접하는 격자에서 계산되는 횡유입량을 고려하여 kinematic wave법 혹은 dynamic wave법에 의해 해석했다.

8) 논의 관개배수

하천의 양안을 따라 발달하고 있는 논은 하천으로부터 취수, 하천으로의 환원, 지하수 함양 등의 수문학적 작용과 아울러 물질순환에도 중요한 기능을 가지고 있다. WEP모델에서는 1개 격자 내에 존재하는 논은 평면적으로 모두 집약해 집약화된 논에 대해서 담수, 증발산, 침투, 지하수 유출, 표면배수 및 측방배수량을 산정할 수 있는 논 모듈을 포함하고 있다. 이것들에 대한 자세한 내용은 Jia 등(2003)을 참고하기 바란다.

2.3 모델 입력자료

WEP 모델을 실제 유역에 적용하기 위해서 필요한 입력자료는 지형, 지질, 표층토양, 하도, 기상, 토지이용, 인구, 상하수도, 우수배수, 농업용수, 공업용수 등에 관련된 유역정보 등 다양하다. 자료들 중 일부는 수치자료나 인쇄물 등으로부터 수집하고, ArcView 상에서 점, 선, 그리고 면자료로 변환된 후 격자형태의 자료로 변환하여 모델의 입력자료로 이용한다. 또한, 이 이외에도 계산에 필요한 여러 가지 인자를 설정할 필요가 있으며, 이것들은 실내 실험이나 기존 문헌의 값을 참고하여 이용할 수 있다(표 1).

3. WEP 모델의 실제유역 적용 사례 소개

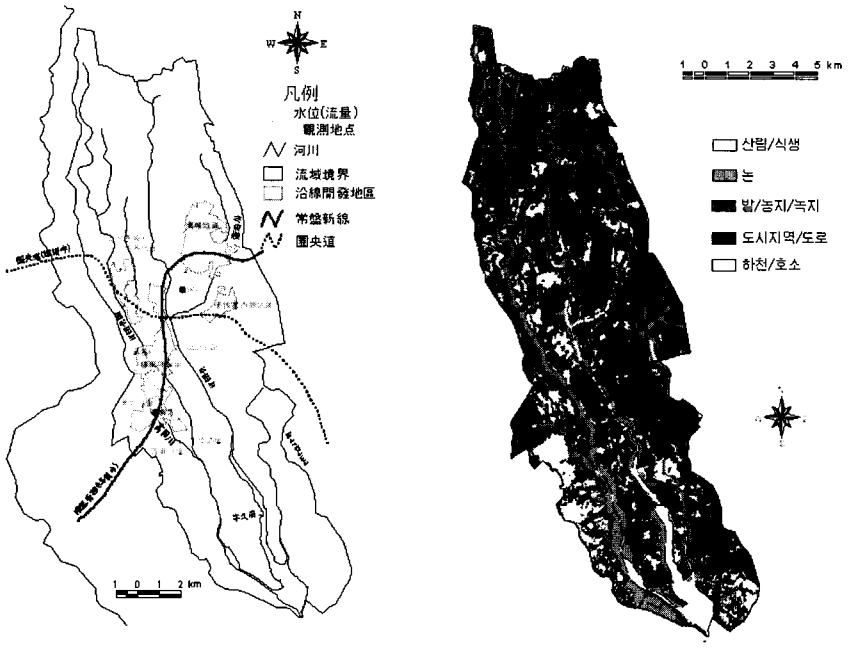
3.1 우시쿠누마(牛久沼) 유역

1) 유역의 개요

모델의 적용 대상인 우시쿠누마 유역의 개요를 그림 3에 나타냈다. 우시쿠누마 유역은 이바라키현(茨城縣) 서부에 위치하고 있는 토네(利根)천 수계의 지류 유역으로, 유역면적은 약 166km^{2}이다. 우시쿠누마에 유입되는 주요한 하천으로는 야타(谷田)천, 니시야타(西谷田)천, 이나리(稲荷)천 등이 있다. 또한, 지류로는 야타(谷田)천의 하수누마(蓮沼)천, 니시야타천의 타카오카(高岡)천 등이 있다. 2005년 개통 예정인 조반신선(常盤新線) 주변의 개발에 의해 우시쿠누마 유역의 물순환 변화가 예상되기 때문에 WEP 모델을 적용함과 동시에 여러 지점에서 하천수 및 지하수의 수량과 수질 모니터링을 계속적으로 실시하고 있다.

표 1. WEP모델의 입력정보

대분류	입력자료
대 상 유 역	대상범위, 유역분할, 인구분포
기 상 조 건	기상관측소의 위치와 표고, 기상관측소의 대표범위, 각 관측지점의 기상자료(강우, 풍속, 일조시간, 기온, 상대습도 등)
지 표 면 조 건	지표면표고, 표면구배, 유하방향, 유입격자의 수(유적), 격자의 계산순서, 계산순서와 대응되는 격자, 토지이용분류별 면적, 토지이용분류별 불침투면적율 등
표 층 토 양	토양종류, 토양인자, 식생인자 등
하 천	하도위치, 하도제원, 하상재료 및 두께
지 하 대 수 층	각 대수층의 두께, 포화투수계수, 저류계수
인 공 계 용 수	생활용수 이용원단위, 일변동 패턴, 상수도 누수율, 사업소 용수량, 관개용수 원단위, 도수지점의 조정범위, 도수지점의 일평균 도수유량, 간이수도 코드 등
인공계 열수지	인공배열 패턴, 인공배열 원단위
초기조건, 경계조건	표층토층의 초기 함수율, 지하수 대수층 1 및 2의 초기 수위, 지하수위 경계로서의 각 관측지점 지하수위의 시계열, 지하수위 경계로서의 대표지점 등



(a) (b)

그림 3. 우시쿠누마 유역. (a) 개요, (b) 토지이용현황

본 유역의 토지이용은 1994년도를 기준으로 산림 및 황무지가 16%, 논이 14%, 밭이 33%를차지하고 있으며, 주택, 도로 및 기타 공공용지 등 도시지역의 면적은 전체 유역면적의 33%이다. 그림 3 중에 나타낸 연선(沿線)개발 예정구역에 대해서는 2005년의 조반신선 개통에 따른 개발이 계획되어 있으므로, 향후 도시지역의 면적율은 41%로 증가될 것으로 예상된다.

2) 해석의 개요와 결과

현재(1998~2001년, 현재상황에 해당) 및 향후(2002년경, 조반신선 연선개발 완료에 해당)의 두 시점을 대상으로 해석을 실시했다. 현재 상황에 대한 계산에서는 현재 상태의 기상조건, 토지이용, 인구 및 하도를 이용했다. 또한, 토지이용변화의 영향을 분석하기 위해 향후 예측계산에서는 향후의 토지이용변화, 예측인구, 현황하도 및 현황기상조건을 이용하였다. 모델 해석의 격자 크기는 100m이며, 계산시간 간격은 1시간으로 하였다.

계산 결과의 한 예로서 니시야타천의 코지라교 지점(집수면적 47.6km^2)에서의 유량을 비교한 결과를 그림 4에 나타냈다. 관개기 및 비관개기 모두 양 지점에 있어서 유량의 계산 결과는 실측수위로부터 구한 유량을 양호하게 재현하고 있으며, 관측기간 중 최대 홍수 사상에 대해서도 실측 수문곡선을 계산값이 잘 재현하고 있다.

유역 내의 복수 지점에 의한 천층 지하수위의 계측결과와 계산값의 비교를 그림 5에 나타냈다. 또한, 유역 내 개발 예정지구에 있는 위치하고 있는 정호 지점에서 천층 지하수위의 연속측정 기록과 계산값의 비교 결과를 그림 6에 나타냈다. 계산결과와 실측값 사이에 차이가 있지만, 전체적인 상관관계는 나쁘지 않다. 차이의 원인은 계산상의 격자 평균고도와 실제의 정호 지점의 지반고 차이나 수리지질 조건의 불균일성으로 생각된다.

현재 기상조건(1999년)에서 년간 물수지에 대한 전체 유역 및 개발지역의 현재와 미래에 대한 해석결과를 그림 7에 나타냈다. 전체 유역의 물수지에 대해서는 증발산량, 침투량 및 지하수 유출은 감소하고, 표

면유출, 상수 및 하수가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 개발지역에 대해서 미래에는 현재와 비교해서 증발산

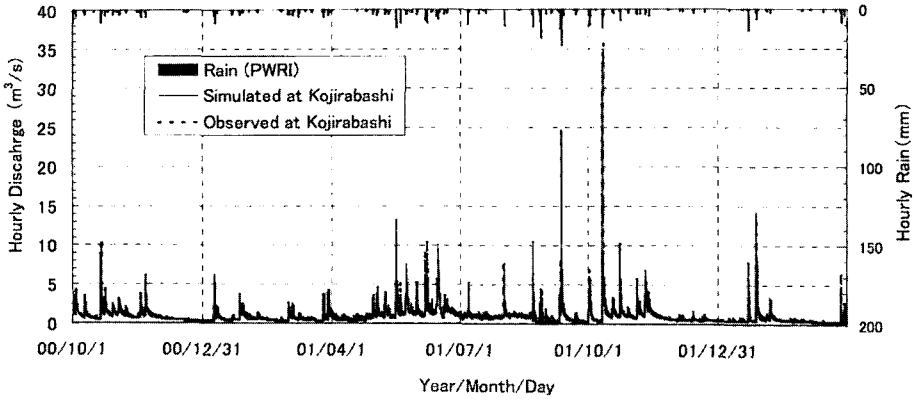


그림 4. 야타천의 코지라교 지점의 실측유량과 계산유량의 비교

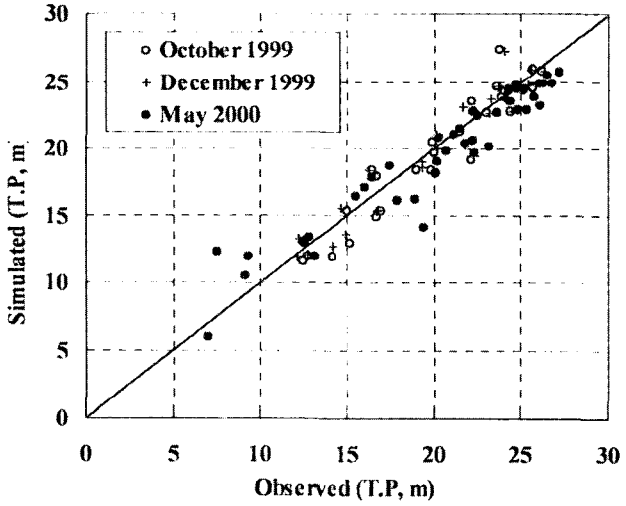


그림 5. 천층 지하수의 실측값와 계산값

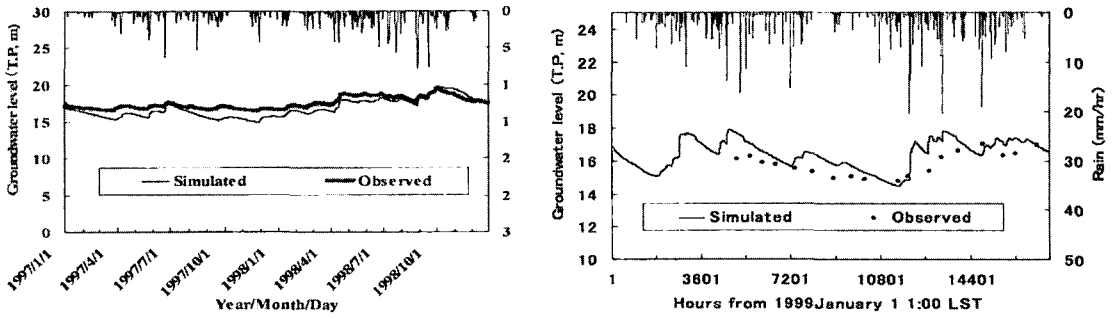
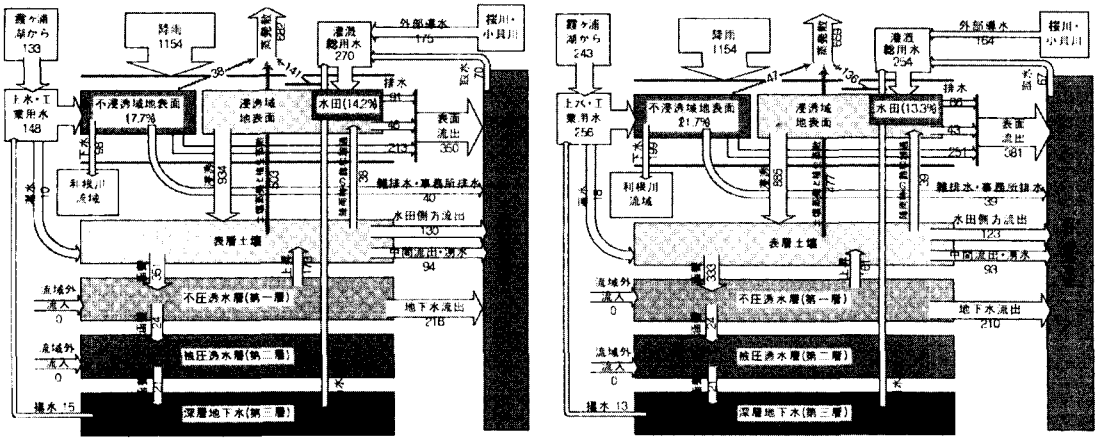
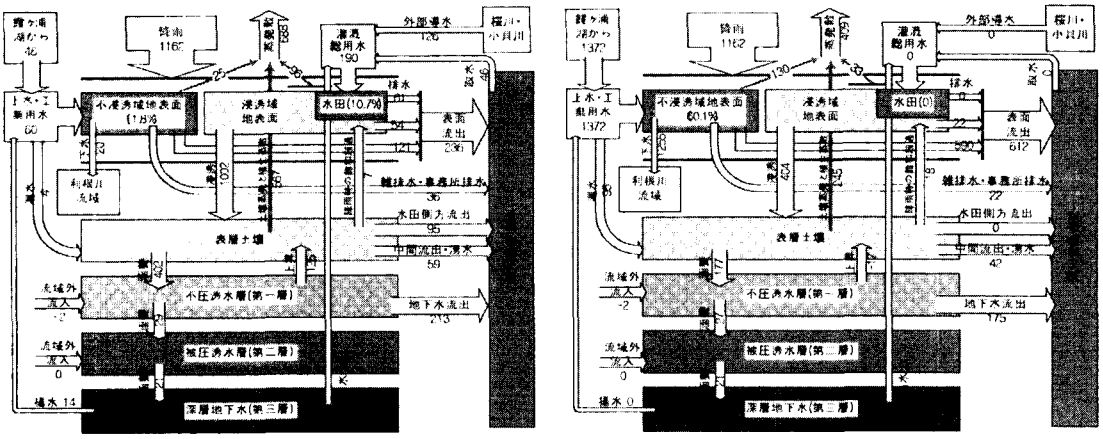


그림 6. 천층 지하수의 정호 실측값과 계산값의 비교



(a) (b)

그림 7-1. 전 유역에 대한 물수지의 비교 결과(단위 mm/년). (a) 현재, (b) 미래



(a) (b)

그림 7-2. 개발 구역에 대한 물수지의 비교 결과(단위 mm/년). (a) 현재, (b) 개발구역

량, 침투량 및 지하수 유출이 각각 279mm(41%), 598mm(60%) 및 38%(18%) 감소해 논의 관개용수가 190mm(100%) 감소하는 결과를 보였다. 한편, 표면유출은 376mm(1.6배), 상수도는 1,312mm(22배)가 증가하였다. 이런 결과로부터 하천유량과 하수도는 각각 258mm(43%)와 1,235mm(62배)가 증가한 것을 알 수 있다.

3.2 에비(海老)천 유역 사례

1) 유역의 개요

에비천 유역의 개요를 그림 8에 나타냈다. 에비천은 지바현(千葉縣) 후나바시(船橋)시, 카마가야시를 포함하고 있으며, 물순환 재생구상의 대상 유역 중 하나이다. 유역면적은 21.0km^{2}이며, 에비천 본류와 마

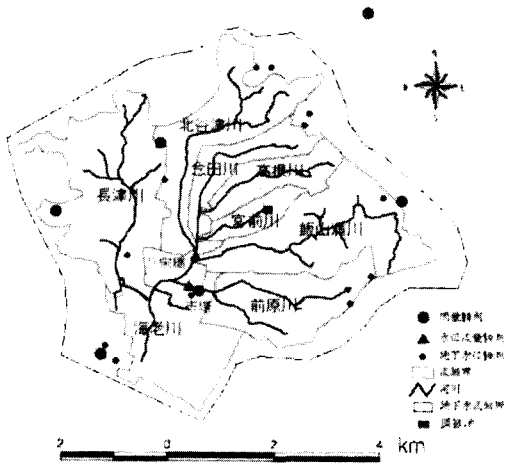


그림 8. 에비천 유역현황

에하라(前原)천 등 7개 지류가 흐르고 있다. 유역 내 또는 유역경계 부근에는 6개소의 유량관측소, 2개소의 하천수위 유량관측 지점 및 13개소의 지하수위 관측지점이 있다. 에비천 유역의 시가화율은 1993년도에 60% 정도이지만, 2035년도에는 약 5.7km²의 산림이나 농지가 에비천 유역의 개요를 그림 8에 나타냈다. 에비천은 지바현(千葉縣) 후나바시(船橋)시, 카마가야시를 포함하고 있으며, 물순환 재생구상의 대상 유역 중 하나이다. 유역면적은 21.0km²이며, 에비천 본류와 마에하라(前原)천 등 7개 지류가 흐르고 있다. 유역 내 또는 유역경계 부근에는 6개소의 유량관측소, 2개소의 하천수위 유량관측 지점 및 13개소의 지하수위 관측지점이 있다. 에비천 유역의 시가화율은 1993년도에 60% 정도이지만, 2035년도에는 약 5.7km2의 산림이나 농지가 도시로 전환되어 도시화가 한층 진전할 것으로 예상된다.

2) 해석 개요와 결과

1992년부터 1996년까지 5년간을 대상으로 해석을 실시하고, 1993년도 관측 자료에 대해서 모델의 보정을 수행했다. 계산 격자의 크기는 50m이며, 시간간격은 1시간이다. 야사카에(八榮)교 지점에 있어서 유량 계산값과 관측값의 비교한 예를 그림 9에 나타냈다. 저수 유량의 일변동 양상이나 홍수 피크유량을 양호하게 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 10은 유역 내의 이찌바(市場) 지점의 자유수면을 가진 지하수위 변동을 비교한 것이다. 지하수위나 지하수위의 변동 양상은 거의 재현하고 있지만, 계산결과와 관측결과 사이에 차이가 있는 기간도 있다. 이것은 야타천과 비슷한 양상이며, 지질이나 지층의 공간적 불균일성을 표현할 수 있는 정도의 현지 자료가 존재하고 있지 않는 것 등에 기인하고 있다고 생각된다.

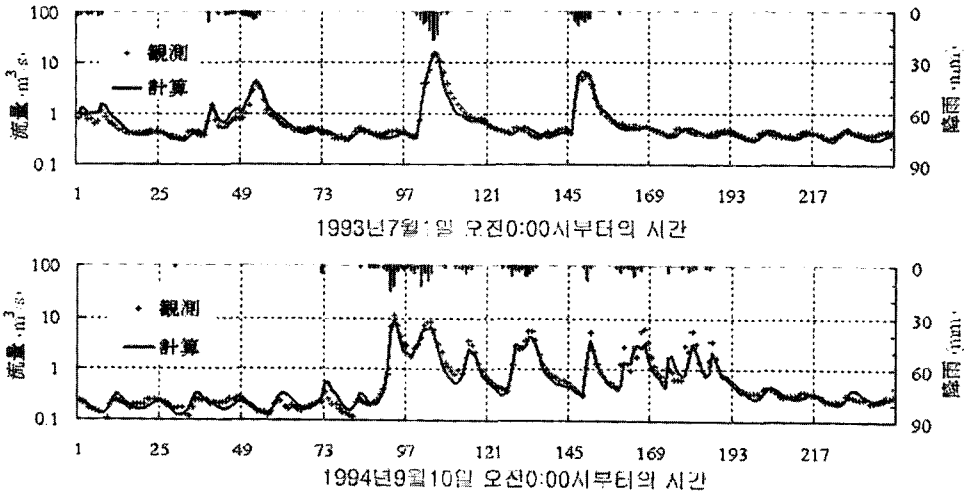


그림 9. 에비천 유역의 야사카에(八榮)교 지점에서의 시간유량의 검증

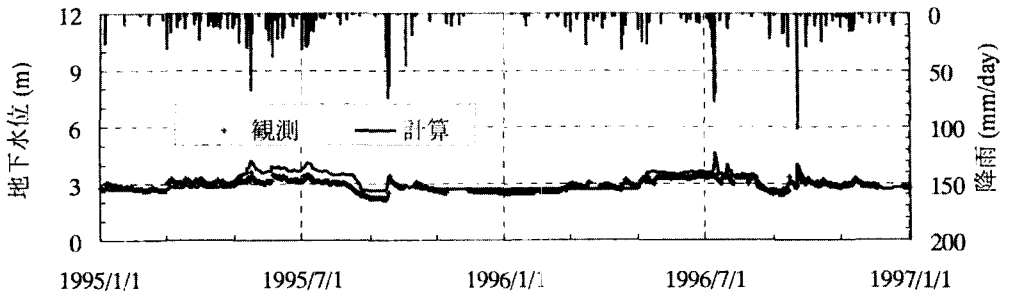
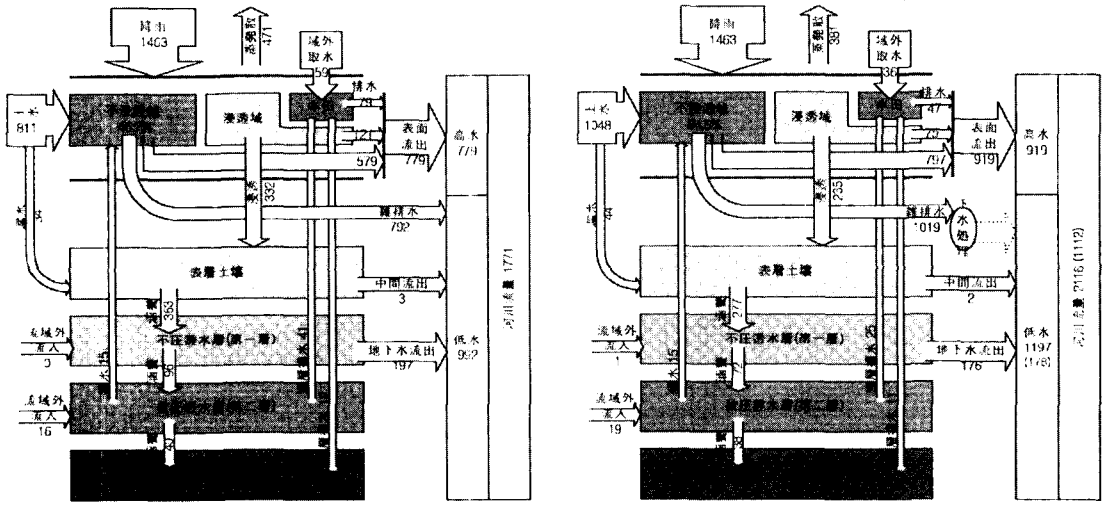


그림 10. 에비천 유역의 이찌바(市場) 지점에서의 지하수위 비교



(a) 현재(1993년도) (b) 미래(2035년도)

그림 11. 에비천 유역의 년간 물수지 해석 결과(단위:mm)

1993년 기상조건을 이용하여 계산했던 현재(1993년)와 향후(2035년)에 대한 유역 전체에서의 년간 물수지 계산 결과를 그림 11에 나타냈다. 현재의 물수지 특징은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 증발산, 침투, 표면유출이 년간 강우량의 각각 32%, 23% 및 53%이며, 자연 유역과 비교해서 침투량이 적지 않고 표면유출이 크게 나타나고 있다. 하천에서의 잡배수량은 중간유출과 지하수유출을 더한 양의 약 4배 정도이다. 또한, 향후에 있어서는 증발산은 90mm 감소, 침투량은 97mm 감소, 지하수 유출은 21mm 각각 감소한다. 한편, 표면유출은 140mm 감소하고, 하천의 유황은 큰 변화가 예상된다. 분류식 하수도의 정비에 의해서 처리수를 직접 바다로 방류하는 경우에는 그림의 하천유출(저수)의 괄호 내에 표시한 것처럼 평상시의 하천유출이 178mm로 감소할 것으로 예상된다. 저수유량을 유지하고 물환경의 보전을 위해서 우수침투시설의 설치에 의한 지하수 함양이나 하수처리수의 재이용 등 효과적인 대책을 추진할 필요가 있다.

3) 각종 대책에 의한 물순환 개선효과의 정량화

불침투지역의 증가에 따라 홍수유량의 증가나 도달시간의 단축에 대응하기 위해 온사이트에 있어서 우수의 저류 침투시설이나 오프사이트에 있어서 방재조절지가 도시하천 유역에 있어서 치수대책으로서 실시

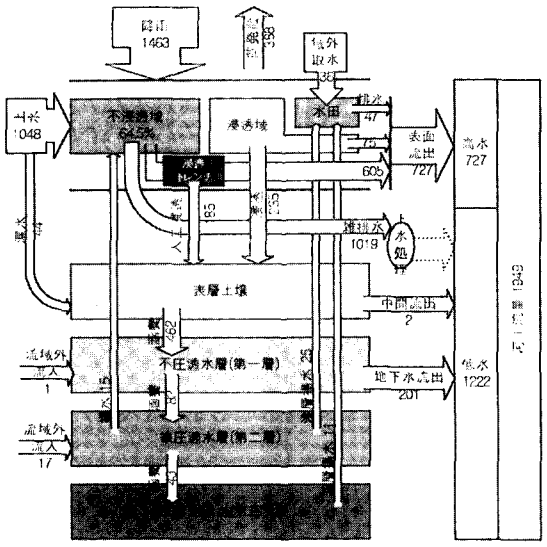


그림 12. 침투 트렌치 도입을 가정한 향후의 물수지 분석 결과

될 수 있다. 아래에서는 이러한 시설의 도입에 의해 치수 이외에도 포함하는 물순환 개선효과의 계산 결과를 소개한다.

(1) 우수침투시설의 도입효과 평가

향후에 있어서 저수유량의 유지나홍수시의 표면유출의 저감을 목적으로 유역 내의지붕우수를 침투시설에 도입하는 대책을 가정하고, 침투 트렌치의 설치가 물순환에 미치는 영향을 검토했다. 침투 트렌치의 설치여부에 대해서는 (1) 토지이용 : 건물용지, (2) 지형 : 구배가 10% 이하, (3) 토양 : 점토 이외, (4) 지질, 지하수위 : 난투수층이 지표면 2m 이하라는 조건을 설정했다. 침투 트렌치의 설치 길이의 원단위로써는 45m/ha, 트렌치의 폭계획수심=1.5m1.0으로 가정하고 침투 트렌치의 설치 길이를 계산했다. 1개 격자가 50m50m이기 때문에 각 격자내 주변 트렌치 길이는 450(m/ha) 0.25(ha) 지붕의 면적율이 된다.

1993년도의 기상조건을 이용하여 2035년 시점에 있어서 침투 트렌치 도입 효과에 대한 해석을 실시했다. 침투 트렌치도입 후의 전체 유역의 물수지를 그림 12에 표시했다. 트렌치에 의한 침투량은 185mm이며, 그림 11(b)와 비교해서도 불압지하수위의 함양량도 증가하고 있다. 증발산은 그다지 큰 변화가 없지만, 표면유출은 약 200mm 감소하고, 하천으로의 지하수 유출도 25mm 증가하는 결과를 볼 수 있다. 침투 트렌치를 적극적으로 도입함으로써 저수시의 지하수 함양과 홍수시의 유출억제 효과를 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.

(2) 방재조절지의 유출 억제 효과 평가

최대시간 강우 50mm/h(재현기간 8.3년), 24시간 연속의 중앙집중형의 계획 강우를 이용하여 미야마에(宮前)천 상류의 시바야마(芝山)단지 제1호 방재조절지(그림 8참조)의 하류에 위치하는 4개 지점(조절지 직하류, 미야마에천 하류단, 에비천 중류부의 야사가와교와 에비천 하구)에서의 유출억제 효과를 계산했다. 또한, 계산 케이스는 방재조절지의 유무와 앞서 언급했던 침투 트렌치의 유무를 조합한 4개 경우를 설정했다. 각 지점에 있어서 유출 수문곡선을 그림 13에 나타냈다.

당연히 조절지 직하류에서 조절지의 홍수억제 효과가 매우 크게 나타났다(88%의 피크 유량 cut). 그에 대해서 조절지의 집수지역은 침투 트렌치의 설치 적지가 적고, 설치 수량이 적기 때문에 침투 트렌치에 의한 효과를 그다지 얻지 못하고 있다. 하류로 가면 합류 하천의 영향 등으로 인해 조절지 단체에 의한 효과는 점점 작아져 미야마에천와 에비천과의 합류점에서 피크

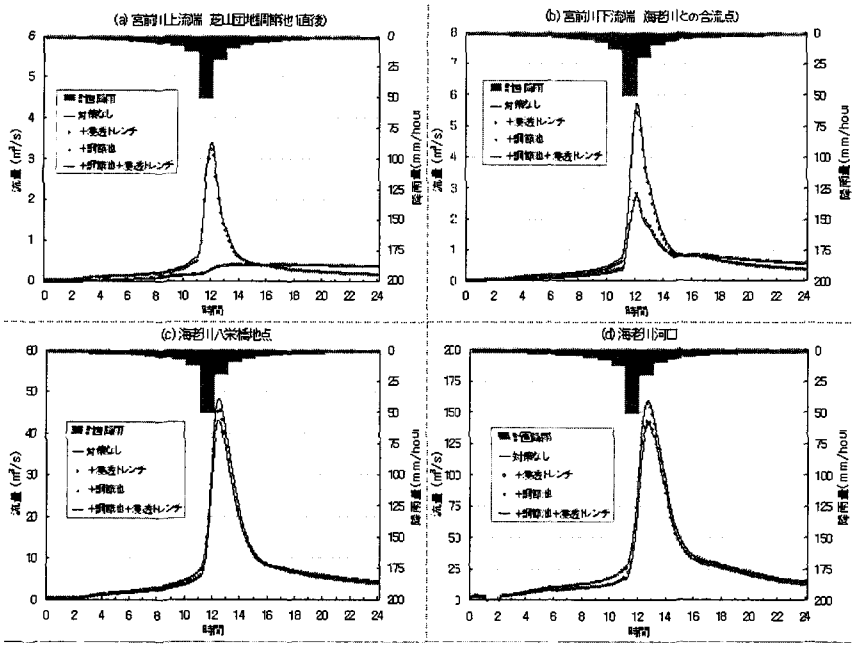


그림 13. 방재조절지 및 침투 트렌치의 유출억제 효과의 비교 결과

cut은 5%, 에비천 하구부에서 피크 cut은 1%로 작아진다. 반대로, 침투 트렌치는 유역 전체에 면적으로 분포하고 있기 때문에 조절지와 비교하여 상류에서의 효과는 작지만, 하류로 갈수록 효과는 커지게 된다. 도시하천유역에서의 홍수유출 억제 대책으로서는 침수 상황이나 하천정비의 진척 상태에 따라 유출 억제 시설을 적절히 조합하는 것이 효과적이라고 생각된다.

4. 결론

본 고에선 유역 물순환계의 정량화를 위한 WEP 모델의 개요와 적용 사례에 대해서 소개하였다. 토목연구소에서는 WEP 모델과 조합해 이용하는 물질순환 모델에 대해서도 계속적으로 개발 중이다.

참/고/문/헌

1) 「都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明」研究会(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—.

2) Jia, Y. and Tamai, N.(1998), Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model, 水文·水資源學會誌, 第11卷, 第2號, pp. 150-163.

3) Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., and Suetsugi, T.(2001), Development of WEP model and its application to an urban watershed, Hydrological Processes, 15, pp. 2175-2194.

4) Jia, Y., G. Ni, J. Yoshitani, Y. Kawahara, and T. Kinouchi(2002), Coupling simulation of water and energy budgets and analysis of urban development impact, J. of Hydrologic Eng., ASCE, Vol.7, No.4, pp. 302-311.

5) Jia, Y., T .Kinouchi and J. Yoshitani(2003), Development of a Paddy Model for WEP Model and Assessment of Paddy's Role in Conserving the Hydrological Cycle in the Yata Watershed Proceedings of APHW2003, Vol.2, pp. 1003-1008.