

## 강우의 공간분포에 따른 침식 및 퇴적의 변동성 분석 Analysis on the Effect of Spatial Distribution of Rainfall on Soil Erosion and Deposition

이 기 하\* / 이 건 혁\*\* / 정 관 수\*\*\* / 장 창 레\*\*\*\*

Lee, Gi Ha / Lee, Kun Hyuk / Jung, Kwan Sue / Jang, Chang Lae

### Abstract

This paper presents the effect of spatially-distributed rainfall on both rainfall-sediment-runoff and erosion or deposition in the experimental Cheoncheon catchment: upstream of Yongdam dam basin. The rainfall fields were generated by three rainfall interpolation techniques (Thiessen polygon: TP, Inverse Distance Weighting: IDW, Kriging) based only on ground gauges and two radar rainfall synthetic techniques (Gauge-Radar ratio: GR, Conditional Merging: CM). Each rainfall field was then assessed in terms of spatial feature and quantity and also used for rainfall-sediment-runoff and erosion-deposition simulation due to the spatial difference of rainfall fields. The results showed that all the interpolation methods based on ground gauges provided very similar hydrologic responses in spite of different spatial pattern of erosion and deposition while raw radar and GR rainfall fields led to underestimated and overestimated simulation results, respectively. The CM technique was acceptable to improve the accuracy of raw radar rainfall for hydrologic simulation even though it is more time consuming to generate spatially-distributed rainfall.

**Keywords** : spatially-distributed rainfall, erosion and deposition, hydrologic response, rainfall interpolation technique, radar rainfall synthetic technique

### 요 지

본 연구에서는 용담댐 상류, 친천 시험유역을 대상으로 분포형 수문모형을 이용하여 강우의 공간분포 특성에 의한 유역에서의 침식 및 퇴적양상을 분석하고, 유출 및 유사량 모의결과에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 강우의 공간적 분포를 묘사하기 위해 사용되는 지점 강우 내삽기법(Thiessen Polygon: TP, Inverse Distance Weighting: IDW, Kriging) 및 레이더 강우 합성기법(Gauge-Radar ratio: GR, Conditional Merging: CM)을 이용하여 태풍으로 인한 3개의 집중호우 사상기간동안의 강우장을 생성한 후 각 기법들에 의해 생성된 강우장의 양적, 공간적 특성을 평가하였다. 또한, 각 기법별로 생성된 공간분포형 강우를 분포형 수문모형에 적용하여 강우의 공간분포에 따른 유역에서의 강우-유사-유출 분석 및 유역에서의 침식 및 퇴적양상을 비교·분석하였다. 그 결과, 지상 우량계를 이용한 내삽기법의 경우 유사한 우량주상도 및 수문응답을 나타내었으며, 원시 레이더 자료 및 GR기법에 의한 결과는 각각 과소, 과대산정된 반면 CM기법은 레이더 강우의 공간적 특성을 유지하면서 양적으로도 개선된 결과를 보여주었다. 또한 양적으로 유사한 강우장임에도

\* 국회입법조사처 경제산업조사실 국토해양팀 입법조사관 (e-mail: leegiha@assembly.go.kr)

Legislative researcher, Land, Transport and Maritime Affairs Team, National Assembly Research Service, Seoul 150-703, Korea

\*\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 석사 (e-mail: kunhyuk@nate.com)

Graduate student, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

\*\*\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 한국교통대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: cljang@ut.ac.kr)

Corresponding Author, Assistant Prof. Dept. of Civil Eng., Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

불구하고, 각 기법에 의한 강우장의 공간적 특성으로 인하여 대상구역내 침식 및 퇴적양상은 매우 상이하게 나타났다.

**핵심용어** : 공간분포형 강우, 침식 및 퇴적, 수문응답, 지점강우 내삽기법, 레이더 강우 합성기법

## 1. 서론

우리나라는 토지이용도의 증가로 인해 유역개발이 지속적으로 이루어지고 있고, 기후변화 등으로 인한 국지적 집중호우의 발생빈도가 높아 토사로 인한 재해의 위험이 증가하고 있는 추세이다(정재학과 이종설, 2008). 따라서 토양침식 및 토사유출로 인한 피해를 예방하고 대응방안을 수립하기 위해서는 토양침식의 발생원인 및 규모에 대한 정확한 예측 및 정량적 평가가 필요하다(이기하 등, 2010). 그러나 국내 토양침식 및 토사유출 방지기술은 사방공학적인 측면에서 일부 시행방법이 확립되어 있으나 토양침식 및 토사유출의 추정방법에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 외국에서 개발된 모형을 일부 수정·보완하여 적용하고 있다(국립방재연구소, 1998).

토양침식은 그 발생원인에 따라 물에 의한 침식(water erosion), 바람에 의한 침식(wind erosion), 중력에 의한 침식(gravity erosion) 등으로 구분될 수 있으며, 국내의 토양침식의 주요형태는 표층유실 및 표층붕괴로써 집중호우에 의한 침투 및 토양 포화도의 변동에 따른 물과 중력에 의한 침식현상이 복합적으로 발생하고 있다(백용 등, 2005). 따라서 강우에 의한 토양침식의 발생 원인과 지역, 그리고 규모 및 기간에 대해 규명하고, 토사의 침식 및 퇴적 정보를 제공할 수 있는 물리적 기반의 분포형 수문모형의 개발이 필요하다(Jetten et al., 2003).

최근에 GIS 및 RS(remote sensing)기술의 비약적 발전과 함께 다양한 GIS기반의 분포형 수문모형(distributed hydrologic model)이 개발되어 수문분야에 활용되고 있으며, 특히 국내의 경우, 토양침식으로 인한 토사유출량 산정을 위해 준분포형 장기유출 모형인 SWAT을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다(갈병석, 2008; 예령 등, 2008; 이근상 등, 2009). 이러한 분포형 수문모형의 경우 기본적으로 래스터 기반의 공간분포형 입력자료를 필요로 하며, 유역의 지형학적, 지질학적 특성을 반영하기 위해 수치지도, 정밀토양도, 토지이용도, 토지피복도 등으로부터 모형의 매개변수를 추정하게 된다. 또한, 토양침식 발생의 주요 외적요인이 되는 강우는 강도뿐만 아니라 공간적 분포형태에 의해 유역에서의 침식 및 퇴적의 양상이 변화할 수 있기 때문에 유역규모(catchment

scale)의 유사유출량 산정을 위해서는 강우의 공간적 특성을 반영한 강우량의 정량적 평가는 필수적이다(Lopes, 1996).

지상 우량계는 그 지점에 대한 정확한 강우 정보를 제공할 수 있으나 우량계와 우량계 사이의 미세측 유역에서는 강우의 공간분포에 대한 정확한 정보를 알 수 없기 때문에 일반적으로 기지의 지점강우 정보를 기반으로 지구통계학적 내삽기법(geostatistical interpolation method)을 이용하여 강우의 공간특성을 추정한다(Shah et al., 1996). 그러나 이러한 내삽기법을 통하여 추정된 강우의 공간분포는 여전히 불확실성을 내포하고 있으며, 일반적으로 지상 우량계의 밀도를 높임으로써 강우의 공간분포에 대한 불확실성을 감소시킬 수 있으나 관측소의 설치 및 관리 비용 면에서 그 실현성이 떨어진다. 반면에 간접적으로 강우를 관측하는 기상레이더는 비록 실제 강우를 관측할 수 없지만, 넓은 면적에 대해 강수와 바람, 대기 난류 등을 짧은 시간에 파악하고 정량화하여 입체적인 분포를 파악할 수 있다. 따라서 시·공간적으로 높은 분해능의 강수관측 자료를 산출하고 이것을 바탕으로 높은 분해능의 면적 강수량이나 지점 강수량을 산정하는 것이 가능하다(정성화 등, 2005).

최근에는 단시간 또는 실시간으로 강우자료의 갱신을 수반하는 기상레이더 자료와 GIS와 연계한 물리적 기반의 강우-유출모형의 활용에 관한 다수의 연구(김병수 등, 2007; 김병식 등, 2007; 박진혁 등, 2008; 배영혜, 2008)가 발표된 바 있으나, 강우의 공간적 분포특성에 의한 유역의 침식·퇴적양상 변동성 및 유역 유사발생량 모의에 대한 연구는 수행된 바가 없다. 표토침식(shallow soil erosion)은 일반적으로 높은 강우강도와 지속적인 강우에 의해 토양이 포화되어 지표류(overland flow)가 발생하게 될 경우 일어나게 되며, 전술한 바와 같이 서로 다른 강우강도의 공간적 분포는 표토의 침식과 퇴적과정에 상당한 영향을 미치게 되며, 결과적으로 유역에서 발생하는 유사량 모의 결과에 대해 불확실성을 제공할 수 있다(Saavedra, 2005). 따라서 분포형 수문모형을 이용하여 유역에서의 침식 및 퇴적 양상을 모의하기 위해서는 강우의 공간분포에 대한 정확한 정보가 요구된다.

본 연구에서는 용담댐 상류, 천천 시험유역을 대상으로

분포형 수문모형(이기하 등, 2010)을 이용하여 강우의 공간 분포 특성에 의한 유역에서의 침식 및 퇴적양상을 분석하고, 유출 및 유사량 모의결과에 미치는 영향을 분석한다. 일반적으로 강우의 공간특성을 묘사하기 위해 사용되는 지점강우 정보를 기반으로 한 내삽기법(Thiessen Polygon; 이하 TP, Inverse Distance Weighting; 이하 IDW, Kriging) 및 지점강우와 레이더 강우의 합성기법(Gauge-Radar ratio; 이하 GR, Conditional Merging; 이하 CM)을 이용하여 태풍으로 인한 집중호우 사상기간동안의 시간별 강우장(hourly rainfall field)을 생성한 후 각 기법들에 의해 생성된 강우장의 공간적 특성을 비교·분석한다. 또한, 각 기법별로 생성된 공간분포형 강우 입력자료를 분포형 수문모형에 적용하여 강우의 공간분포에 따른 유역에서의 수문학적 응답(hydrologic response)의 변동성을 평가한다.

## 2. 지상 우량계 및 레이더를 이용한 강우의 공간분포

최근 강우 관측기술의 발달로 레이더를 이용한 강우량 산정에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 레이더는 지상 우량계에 비해 상당히 높은 공간 밀도의 강우에 대한 정보를 제공 할 수 있다(김병식 등, 2007). 하지만 레이더는 직접적인 지상의 강우강도를 측정하는 것이 아니라 관측된 레이더 반사도를 이용하여 반사도와 강우강도의 관계를 통해 지상의 강우강도를 추정하여 사용하는 간접 측정치이다. 따라서 상대적으로 높은 정확도를 갖는 지상 강우자료와 공간적인 분포경향을 파악할 수 있는 레이더 강우의 장점을 조합하게 되면, 공간적으로 분포된 정도 높은 강우 자료를 획득하는 것이 가능해진다(Seo et al., 1990; Todini, 2001; MacLaughlin, 2002). 본 연구에서는 지점 강우를 이용한 TP, IDW, Kriging 기법 및 레이더와 지상 강우자료의 합성기법인 GR, CM을 이용하여 분포형 수문모형 적용을 위한 격자구조의 공간분포형 강우 입력 자료를 생성하였으며, 각 기법별 특성은 간략히 다음과 같이 요약할 수 있다.

### 2.1 Thiessen Polygon 기법

이 방법은 일반적으로 우량계가 유역 내외에 불균등하게 분포되어 있을 경우 사용하며, 전 유역면적에 대한 각 관측지점의 지배면적을 가중인자로 하여 임의유역에 대한 평균우량을 산정하게 된다.

$$P_m = \frac{A_1P_1 + A_2P_2 + \dots + A_nP_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ : 각 관측점에서의 강우량,  $A_i$ : 각 관측점의 지배면적( $\text{km}^2$ ),  $P_m$ 은 임의 대상유역의 면적평균강우량이다. 각 관측점에 해당하는 고유의 다각형(또는 소유역)내에서의 모든 격자의 강우는 동일하게 된다.

### 2.2 Inverse Distance Weighting 기법

인접한 기지 관측소 좌표와 강우를 추정하고자 하는 미지 관측소 좌표까지의 거리에 따라 비선형적으로 변화하는 경중률을 계산하며, 기본 가정은 서로 다른 기지 관측소 좌표가 하나의 미지관측소 좌표에 미치는 영향은 미지 관측소 좌표로부터 기지 관측소 좌표까지의 거리에 따라 감소한다는 것으로 강우 추정 값은 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n P_i d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-m}} \quad (2)$$

여기서,  $P_x$ 는 미지 관측소 좌표에서의 강우량,  $d_i$ 는 미지 관측소 좌표에서 주변의 기지 관측소 좌표  $i$ 까지의 거리,  $P_i$ 는 기지 관측소에서의 강우량,  $m$ 은 가중치,  $n$ 은 추정을 위해 사용된 자료의 총개수를 나타낸다. Eq. (2)를 다시 정리하면 Eq. (3)과 같으며,

$$P_x = \sum_{i=1}^n P_i \lambda_i \quad (3)$$

단, 경중률( $\lambda_i$ ) =  $\frac{d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-m}}$  이다.

### 2.3 Kriging 기법

Kriging은 관심이 있는 좌표에서의 강우 값을 추정하기 위해 주변의 기지 강우자료의 선형조합으로 그 값을 예측하는 지구통계학적 기법이며, 이를 간단히 수식으로 정리하면 Eq. (3)과 동일하다(최중근, 2007). Kriging의 경우 IDW와 달리 경중률  $\lambda_i$ 를 계산하기 위해 지점 관측자료의 공간상관구조를 검증하는 반분산함수(semi-variogram)가 필요하며, 일반적으로 자료는 공간적으로 연속적이지 않기 때문에 반분산함수를 유도하기 위해 자료의 분기

리별 반분산함수를 구해야 한다. 보통 일정 간격의 분기 거리와 허용거리(tolerance)를 이용하여 (분기거리±허용거리)의 범위내의 자료들 간의 반분산을 평균하여 거리에 따른 실험적 반분산함수(experimental semi-variogram)를 구하게 되며, 이를 수식화하면 Eq. (4)와 같다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

여기서,  $\gamma(h)$ 는 분기거리(lag distance)  $h$ 에 대한 반분산함수,  $x$ 는 변량(variable)의 위치,  $z(x)$ 는 위치  $x$ 에서 변량의 값,  $n$ 은 분기거리와 허용거리를 고려한 구간 내에 존재하는 자료 쌍의 개수를 의미한다.

또한 Eq. (4)와 같은 실험적 반분산함수로는 Kriging 적용이 불가능하므로 실험적 반분산함수를 가장 잘 묘사하는 모형(Gaussian, Exponential, Spherical 등)을 선택하게 되고, 이와 같은 모형을 이용한 반분산함수를 분석적 반분산함수(analytical semi-variogram)라고 한다. 본 연구에서는 강우에 대한 반분산함수를 구할 경우 자주 사용되는 Spherical 모형(Todini, 2001; Sinclair and Pegram, 2005)을 이용하였다.

## 2.4 Gauge-Radar ratio 기법

GR기법은 지상강우과 레이더 강우의 보정계수를 계산하여 레이더 강우를 보정하는 기법으로 단일 매개변수 우량계 보정기법과 다중 매개변수 우량계 보정기법으로 구분된다(배영혜, 2008). 본 연구에서는 다중 매개변수 우량계 보정기법을 사용하였으며, 이 기법은 레이더 관측 영역 내에 존재하는 다수의 지점 강우자료를 활용하여 지점별 보정계수를 산출한 후, 모든 지점별 보정계수를 레이더 관측영역 내의 모든 격자 강우의 보정에 사용하는 방법이다. 이상의 GR기법을 이용한 레이더 강우의 보정은 Eq. (5)에 의해 수행된다.

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad ; \lambda_i = G_i/R_i \quad (5)$$

여기서,  $\lambda_i$ 는 지점별 보정계수,  $G_i$ 는 지상 강우,  $R_i$ 는 레이더 강우,  $d_i$ 는 현재 보정 대상인 레이더 격자와  $\lambda_i$ 를 제공한 우량계 지점 간의 거리이다. Eq. (5)는 IDW기법과 마찬가지로 거리에 따른 경증률의 변화를 고려할 수 있으며, 이렇게 계산된 경증률을 이용하여 Eq. (6)에 의해 레이더 강우를 보정한다.

$$P_{GR} = P_R \times \bar{\lambda} \quad (6)$$

여기서,  $P_{GR}$ 는 평균 보정계수를 사용한 보정 레이더 강우,  $P_R$ 는 보정 전의 레이더 강우이다.

## 2.5 Conditional Merging 기법

Sinclair and Pegram (2005)에 의해 제안된 조건부 합성기법은 레이더 강우와 지상 강우 사이에 고유의 공분산(covariance)을 유지하고 있음을 기본가정으로 하여 레이더 강우의 공간 상관 구조를 유지하면서 지상 강우를 내삽하게 된다(김경준, 2008).

CM기법의 적용순서는 (1) 지상 강우를 Kriging기법에 의해 내삽하고, (2) 지상 강우자료가 관측된 격자에서의 레이더 강우를 이용하여 Kriging기법을 적용한 후 원시 레이더 강우와 내삽된 레이더 강우의 오차를 산정하고, (3) 최종적으로 (2)과정에서 계산된 오차를 지상 강우자료의 Kriging 추정치에 더하게 되면 합성 강우를 얻을 수 있다. CM기법에 보정된 레이더 자료의 오차 구조를 수식으로 표현하면 Eqs. (7)~(13)과 같다.

$$Z(s) = G_k(s) + [Z(s) - G_k(s)] \quad (7)$$

$$R(s) = R_k(s) + [R(s) - R_k(s)] \quad (8)$$

$$M(s) = G_k(s) + [R(s) - R_k(s)] \quad (9)$$

$$E[Z(s) - M(s)] = E[(Z(s) - G_k(s)) - (R(s) - R_k(s))] \quad (10)$$

$$Var[Z(s) - M(s)] = E\{[(Z(s) - G_k(s)) - (R(s) - R_k(s))]^2\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &= Var[(Z(s) - G_k(s)) + Var[(R(s) - R_k(s))] \\ &\quad - 2Cov[(Z(s) - G_k(s))(R(s) - R_k(s))] \\ &= \beta(1 - \rho) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\beta = Var[(Z(s) - G_k(s)) + Var[(R(s) - R_k(s))] \quad (13)$$

여기서,  $Z(s)$ 는  $s$  위치에서의 참(true) 강우

$G_k(s)$ 는 Kriging에 의해  $s$  위치에서의 공간 분포된 지상 강우

$R_k(s)$ 는 Kriging에 의해 공간 분포된  $s$  위치에서의 레이더 강우

$R(s)$ 는  $s$  위치에서 관측된 레이더 강우

$M(s)$ 는 지상강우 보정에 의한 레이더 강우

$\rho$ 는  $[Z(s) - G_k(s)]$ 와  $[R(s) - R_k(s)]$ 의 상관계수

CM기법에 대한 보다 자세한 이론적 설명은 김병식 등(2007), 유철상과 박주영(2008), 홍승진 등(2010)의 연구에서 찾아볼 수 있다.

### 3. 분포형 강우-유사-유출 모형

본 연구에서는 침식 및 퇴적의 공간분포에 대한 분석을 위해 사면의 지표 및 지표하 흐름을 고려한 유출모의 모듈과 단위수류력 이론을 기반으로 한 유사유출 모듈을 결합하여 개발된 분포형 강우-유사-유출 모형(이기하 등, 2010)을 이용하였다. 이 모형은 지상 우량계 및 레이더를 이용하여 생성된 격자형태의 공간분포형 강우자료의 입력이 가능하며, 임의 유출구(outlet)에서의 유출량 및 유사량뿐만 아니라 강우기간동안의 유역내 침식 및 퇴적에 관한 계산결과를 ArcGIS기반의 ASCII파일 형태로 제공하기 때문에 임의 시-공간에 대한 침식 및 퇴적에 관한 정보획득이 매우 용이하다.

강우-유출 모의는 수치지도를 통해 생성된 지형정보, 토지피복에 따른 조도계수, 지표하 흐름해석을 위한 토양 특성 등을 비롯한 격자기반의 공간분포형 강우 등을 고려하여 각 격자에서의 강우에 따른 유출을 계산하며, 사면의 흐름해석을 위한 지배방정식은 지표흐름과 지표하 흐름(비포화 흐름과 포화 흐름)을 고려한 Kinematic Wave 방정식을 기반으로 한다.

Fig. 1은 수문모의를 위해 대상유역을 격자기반으로 분할한 형태 및 각 격자에서의 지표흐름과 지표하 흐름 계산을 위한 개념적인 수위-유량 관계식을 나타내고 있으며, 강우지속기간동안 각 격자에서 수심증가에 따른 유량은 Eqs. (14) and (15)로 계산된다.

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta & : 0 < h \leq d_c \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) & : d_c < h \leq d_s \quad (14) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m & : d_s < h \end{cases}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x,t) \quad (15)$$

여기서,  $v_c = k_c i$ ,  $v_a = k_a i$ ,  $k_c = k_a/\beta$ ,  $\alpha = \sqrt{i}/n$ ,  $q$ 는 단위 폭당 유량( $m^2/s$ ),  $h$ 는 수심(m),  $i$ 는 경사,  $k_c$ 는 비포화대층의 투수계수( $m/s$ ),  $k_a$ 는 포화대층의 투수계수( $m/s$ ),  $d_c (= D\theta_c)$ 는 비포화대층의 두께(m),  $d_s (= D\theta_s)$ 는 비포화대층과 포화대층의 두께(m),  $n$ 은 조도계수( $m^{-1/3}$ ),  $\beta$ 는 투수율 ( $k_a/k_c$ ),  $m$ 은 5/3이다.

유사유출 모의의 경우 격자별 유사량은 빗방울 및 지표류 흐름에 의한 토양분리를 고려하여 계산되며, 각 격자별 이송능력과 상류격자에서 유입되는 유사량과의 실시간 비교를 통해 침식과 퇴적을 계산하게 되며 이송능력은 Yang (1972)이 제안한 단위수류력 이론을 기반으로 결정된다. 유사유출을 위한 유사연속방정식과 순 침식(net erosion)의 계산식은 Eqs. (16) and (17)로 정의되며, Fig. 1의 격자별 토양침식 및 퇴적과정의 모의를 위한 이송능력(transport capacity, TC) 계산식은 Eq. (18)과 같다.

$$\frac{\partial (h_s C)}{\partial t} + \frac{\partial (q_s C)}{\partial x} = e(x,t) \quad (16)$$

$$e(x,t) = DR + DF \quad (17)$$

여기서  $C$ 는 지표류의 유사농도( $kg/m^3$ ),  $h_s$ 는 지표류의 수심(m),  $q_s$ 는 지표류의 단위폭당 유량( $m^2/s$ ),  $e$ 는 순 침식( $kg/m^2/hr$ ),  $DR$ 은 빗방울에 의한 토양분리량,  $DF$ 는 지표류에 의한 토양분리량이다.

$$TC = 10^{\log C_t} = 5.435 - 0.286 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{\omega} + \left( 1.799 - 0.409 \log \frac{\omega d_{50}}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{\omega} \right) \log \left( \frac{VS}{\omega} - \frac{V_{cr} S}{\omega} \right) \quad (18)$$

여기서,  $C_t$ 는 총 유사 농도(ppm),  $VS$ 는 단위수류력(unit stream power),  $V_{cr} S$ 는 한계단위수류력,  $\omega$ 는 침강속도 ( $m/s$ ),  $U_*$ 는 마찰속도( $\sqrt{gih_s}$ ,  $m/s$ ),  $\nu$ 는 동점성계수 ( $m^2/s$ ),  $d_{50}$ 은 중앙입경(mm)이다.

최종적으로 이송능력  $TC$ 와 해당 격자에 유입되는 유

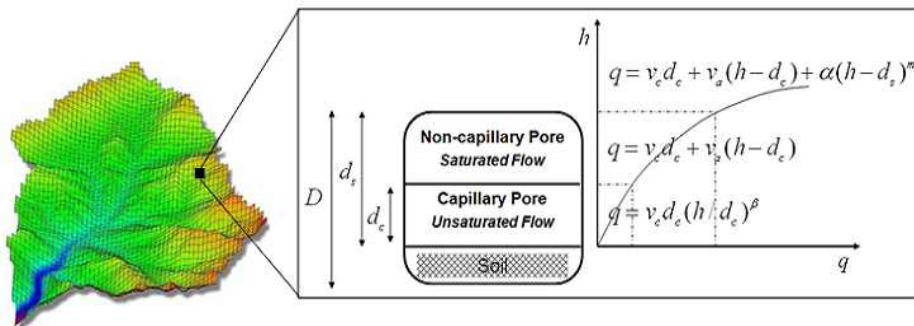


Fig. 1. Schematic Rainfall-runoff Process

사량  $Q_{sed}$ 를 비교하여 침식 또는 퇴적을 결정한다. 임의의 격자에서 흐름의 이송능력이 상류 격자로부터 유입되는 유사량보다 클 경우  $TC - Q_{sed}$  만큼의 유사가 침식되고 반면에 흐름의 이송능력이 공급되는 유사량보다 작을 경우  $Q_{sed} - TC$  만큼의 유사가 퇴적된다. 분포형 강우-유사-유출 모형에 대한 보다 상세한 내용은 이기하 등(2010)에 기술되어 있다.

#### 4. 모형의 적용 및 결과

##### 4.1 대상유역 현황 및 수문자료 구축

본 연구에서는 모형의 보정 및 검증에 사용되는 수위-유량 및 유량-유사량 관계곡선식의 자료획득이 비교적 용이한 용담댐 상류 천천유역(289.9 km<sup>2</sup>; 한국수자원공사 시험유역)을 대상으로 기상청 AWS 및 오성산 레이더 자

료를 이용하여 태풍으로 인한 3개의 강우사상을 선정하였으며, 선정된 사상은 Table 1과 같다. 레이더 강우 처리를 위하여 각 강우사상별 일정고도면 자료(CAPPI)를 추출하고,  $Z-R$ 관계식( $Z = AR^b$ )에 매개변수( $A=200, b=1.6$ ; Marshall and Palmer, 1948)를 적용하여 각 사상별 1시간 단위의 강우강도 자료를 생성하였다. 또한 기개발된 분포형 강우-유사-유출 모형과의 호환을 위하여 지상 우량계의 경·위도 좌표 및 각 지점별 강우정보를 기반으로 다양한 격자크기의 강우의 공간분포화가 가능한 전처리 모듈을 개발·적용하였다.

TP와 IDW기법의 경우 대상유역 내·외에 인접한 총 8개 지점의 지상 우량계 자료를 이용하여 공간분포형 강우를 생성하였으며, Kriging 기법의 경우, 8개 지점만으로는 반분산함수를 산정하는데 제약적이므로, 오성산 레이더 관측범위내의 기상청 AWS 134개 지점을 이용하여 공간

Table 1. Selected Rainfall Events

Event	Rainfall Duration	Typhoon	Used for
1	2002.08.30.17:00 ~ 09.01.14:00 (45 hrs)	Rusa	Calibration
2	2003.09.11.21:00 ~ 09.13.12:00 (39 hrs)	Maemi	Validation
3	2007.09.14.06:00 ~ 09.17.06:00 (72 hrs)	Nari	Validation

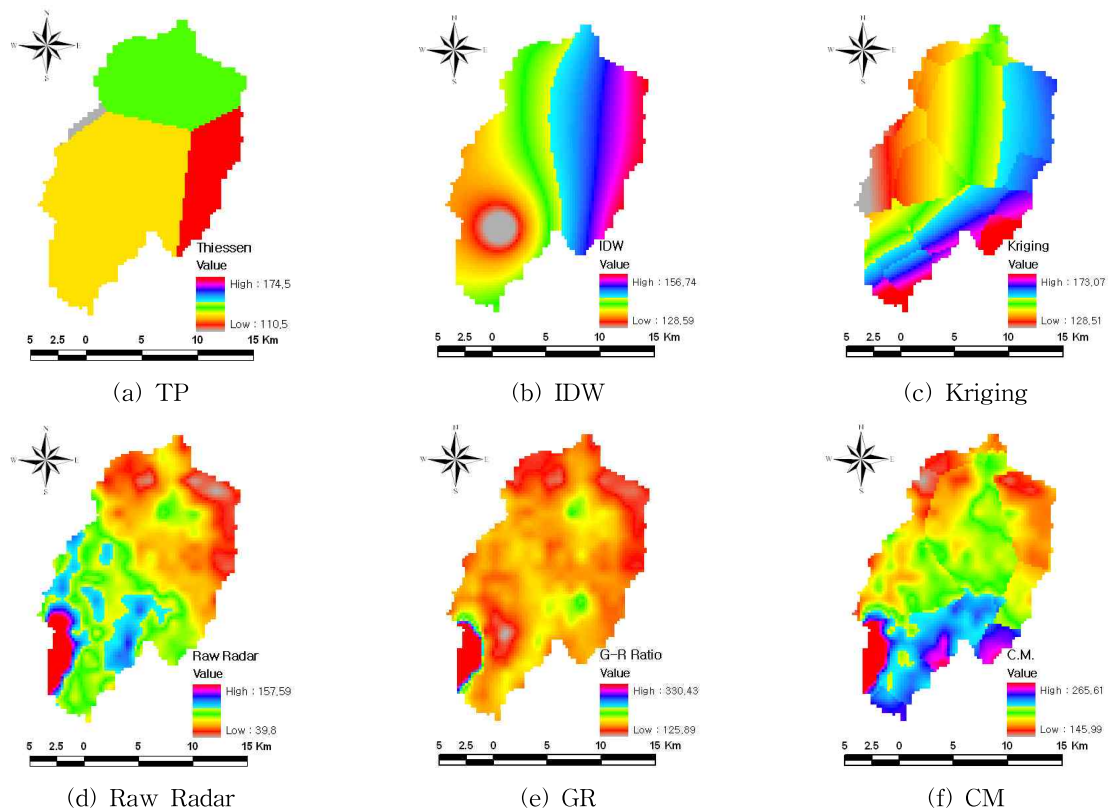


Fig. 2. Comparison of Spatially-distributed Rainfall Fields (Typhoon "Maemi")



분포형 강우를 생성한 후, 대상구역이 포함되는 영역만큼 을 분리하여 분석하였다.

Fig. 2는 2003년 태풍 ‘매미’로 인한 강우사상의 각 기법별 강우의 공간분포 결과를 나타내고 있으며, 지상 우량계를 이용한 TP, IDW, Kriging 기법에 의한 강우의 공간분포 결과는 (a), (b), (c)와 같으며, 원시 레이더 강우는 (d), GR과 CM 기법을 이용하여 합성된 강우의 공간분포 결과는 (e), (f)와 같다. TP의 경우 대상구역에 대해서 소수의 다각형으로 구분되기 때문에 강우의 공간분포에 대한 특성을 명확히 묘사하기 어려운 반면, 이외의 IDW 및 Kriging의 경우 비교적 다양한 범위의 강우정보를 공간적으로 나타내고 있다. 그러나 TP, IDW, Kriging에 의해 생성된 강우장은 원시 레이더 자료와는 공간적으로 매우 상이한 경향을 보이고 있고, 레이더 강우의 경우 지점 우량에 비해 일부 격자에서 과소산정(최소값 : 39.8mm)된 것을 확인할 수 있다. 반면에 강우에 대한 레이더의 공간특성 및 지점 강우의 양적 정보를 동시에 활용한 합성기법 GR 및 CM의 경우 레이더의 공간특성을 유지하면서 과소산정된 레이더 강우가 개선된 것을 확인할 수 있다.

공간분포형 강우장 생성을 위한 각 기법들의 특성에 의해 대상구역내 독립된 격자에서는 기법별로 강우량이 상이할 수 있다. 따라서 Fig. 2의 격자별 강우량을 합산한 후,

유역전체에 대해 각 사상별 면적평균강우량의 시계열을 Fig. 3과 같이 계산하였다.

2002년 태풍 “루사”의 경우 지상 우량계 강우정보만을 이용하여 합성된 TP, IDW, Kriging 기법의 경우 침두우량의 발생시기 및 크기가 유사한 경향을 보이고 있는 반면, 원시레이더 자료의 경우 과소산정(3.3mm)되었으며, GR기법의 경우 지점 우량보다 상대적으로 작게 관측된 레이더 자료로 인해 Eq. (5)의 지점별 보정계수  $\lambda_i$ 가 크게 산정되고, 이로 인하여 유역전체의 면적강우량은 과대산정된 결과를 나타내었으며, 침두우량의 발생시기 역시 다른 기법들에 비해 5시간 전에 발생하는 것으로 나타났다. CM 기법의 경우 지점 강우보다 상대적으로 상당히 과소산정된 레이더 자료 때문에 지점 강우자료에 그 결과가 종속적이며, Kriging기법과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

2003년 태풍 “매미”의 경우 Fig. 2와 같이 각 기법별로 강우분포가 공간적으로 상이함에도 불구하고, TP, IDW, Kriging기법에 의한 면적평균강우량은 시간적, 양적 변화가 매우 유사하게 나타난 반면, 원시 레이더 자료의 경우 시간적 변화는 다른 기법들과 유사함에도 불구하고, 침두우량을 제외한 나머지 시간에서 대부분 지상 우량계 강우보다 과소산정 되었다. GR기법의 경우 침두우량 발생시간은 동일하나 타 기법에 비해 약 10~20 mm 정도 과대

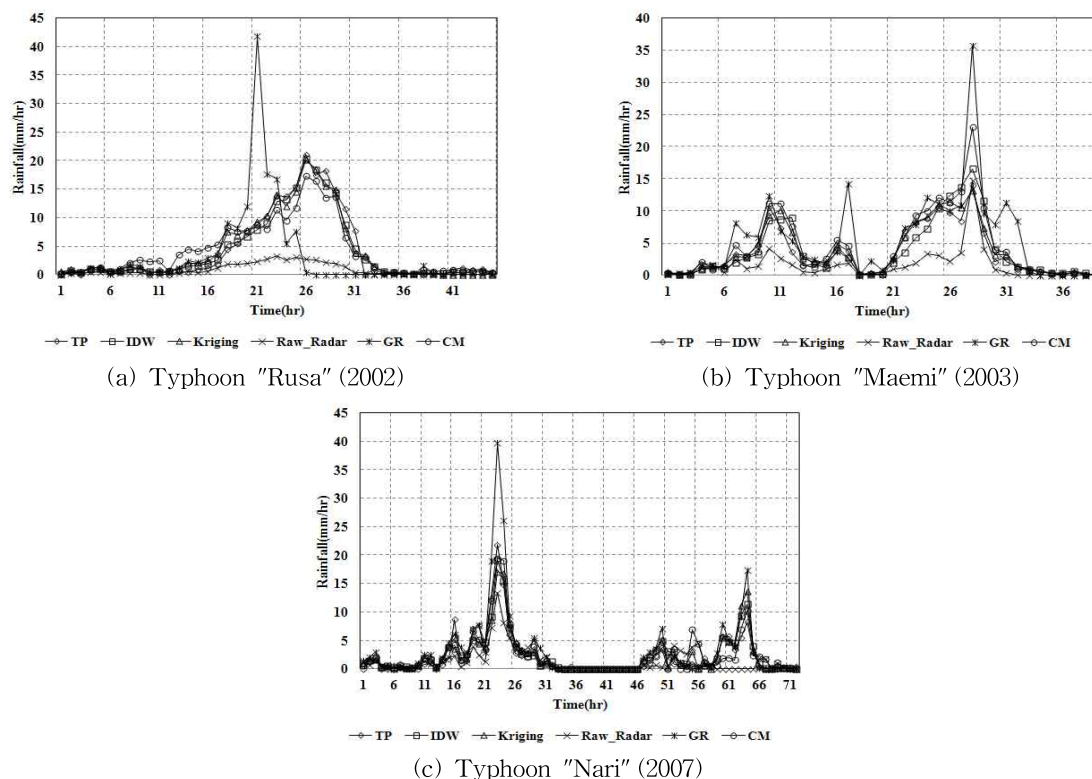


Fig. 3. Comparison of Areal Rainfall Time Series for the Three Events

산정 되었으며, CM기법의 경우 레이더 강우의 공간적 특성을 유지하면서 양적으로도 매우 향상된 결과를 제공하였다. 앞선 두 강우사상과 마찬가지로, 2007년 태풍 “나리”의 경우 지상 우량계를 이용한 내삽기법에 의한 강우장은 각 기법별로 공간특성이 상이하게 나타났음에도 불구하고 대상구역내 면적평균강우량은 유사하게 분석되었으며, 원시 레이더 자료(2007년 이후 C밴드 레이더에서 S밴드 레이더로 교체)는 “루사”, “매미”의 경우보다 상대적으로 개선되었으나 여전히 과소산정 되었으며, GR기법은 과대산정, CM기법은 지상 우량계를 이용한 기법들과 유사한 결과를 나타냈다.

이상의 결과로부터 태풍으로 인한 집중호우 등과 같은 극한사상의 경우 원시 레이더 자료의 가공없이 수문해석

에 이용할 경우 해석결과의 불확실성을 유발할 수 있으며, 지상 우량계의 밀도가 충분하지 않을 경우 GR기법을 이용할 경우 왜곡된 강우정보를 생성되는 반면, CM기법을 이용하여 보정된 레이더 강우는 비교적 타당한 면적평균 강우량 정보를 제공할 수 있는 것으로 확인되었다.

#### 4.2 강우-유사-유출 모의 결과

4.1절에서 생성된 3개의 강우사상에 대해 각 기법별로 생성된 공간분포형 강우를 분포형 수문모형에 적용하였으며, 본 연구에서 모형의 매개변수는 이기하 등(2010)이 제시한 값을 사용하여 대상구역의 강우-유사-유출 모의를 수행하였다. 각 사상별로 모의된 유출수문곡선 및 유사량곡선의 결과는 Figs. 4~6 및 Figs. 7~9와 같다.

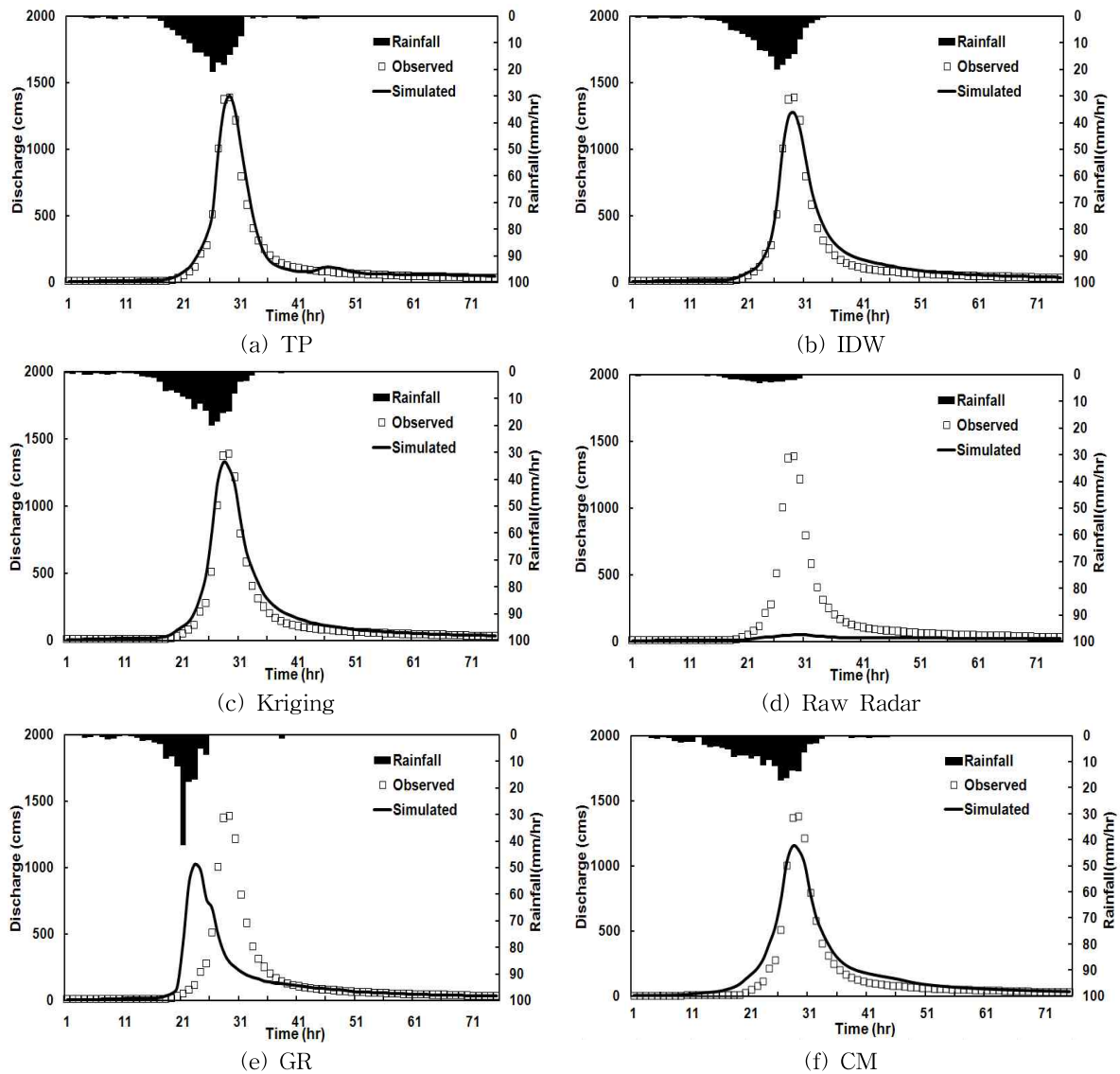


Fig. 4. Rainfall-runoff Simulation Results (Typhoon "Rusa")



Figs. 4~9에 대한 모형의 재현성 평가를 위하여 모의된 유출수문곡선과 유사량곡선의 첨두시간, 첨두치 및 Nash and Sutcliffe (1970)의 효율성 지수(Eq. (19)) 계산결과를 Table 2에 정리하였다.

$$EI = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O})^2} \quad (19)$$

여기서,  $N$ 은 자료의 개수,  $O_t$ 와  $P_t$ 는 시간  $t$ 에서의 유량 및 유사량의 실측치와 모의치,  $\bar{O}$ 는 실측치의 평균값을 나타낸다.

각 사상별로 살펴보면 태풍 “루사”의 강우-유사-유출

모의 결과의 경우 실제 관측된 첨두시간은 2002년 8월 31일 22시이고, 첨두유출량 및 첨두유사유출량은  $1384.7 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $4391.3 \text{ mg/l}$ 이며, 지상 우량계를 이용한 내삽기법 TP, IDW, Kriging은 모두 모의결과에서 우수한 재현성을 나타낸 반면, 원시 레이더 강우를 적용한 경우 유출량(Fig. 4(d))과 유사량(Fig. 7(d)) 모두 과소산정되었다. GR기법의 경우 왜곡된 강우장에 의해 관측치와의 오차가 심각하게 발생한 반면, 과소산정된 레이더 자료와 Kriging으로 보정한 지점 강우 자료를 합성한 CM기법의 경우 유사량과 유출량 모두 개선된 모의결과를 획득할 수 있었다. 그러나 전술한 바와 같이 태풍 “루사”의 경우 CM에 의해 생성된 강우장의 경우 과소산정된 레이더 자료에 의해 그 결과가 지점 강우 자료에 지배적이며, 지상 우량계를 이

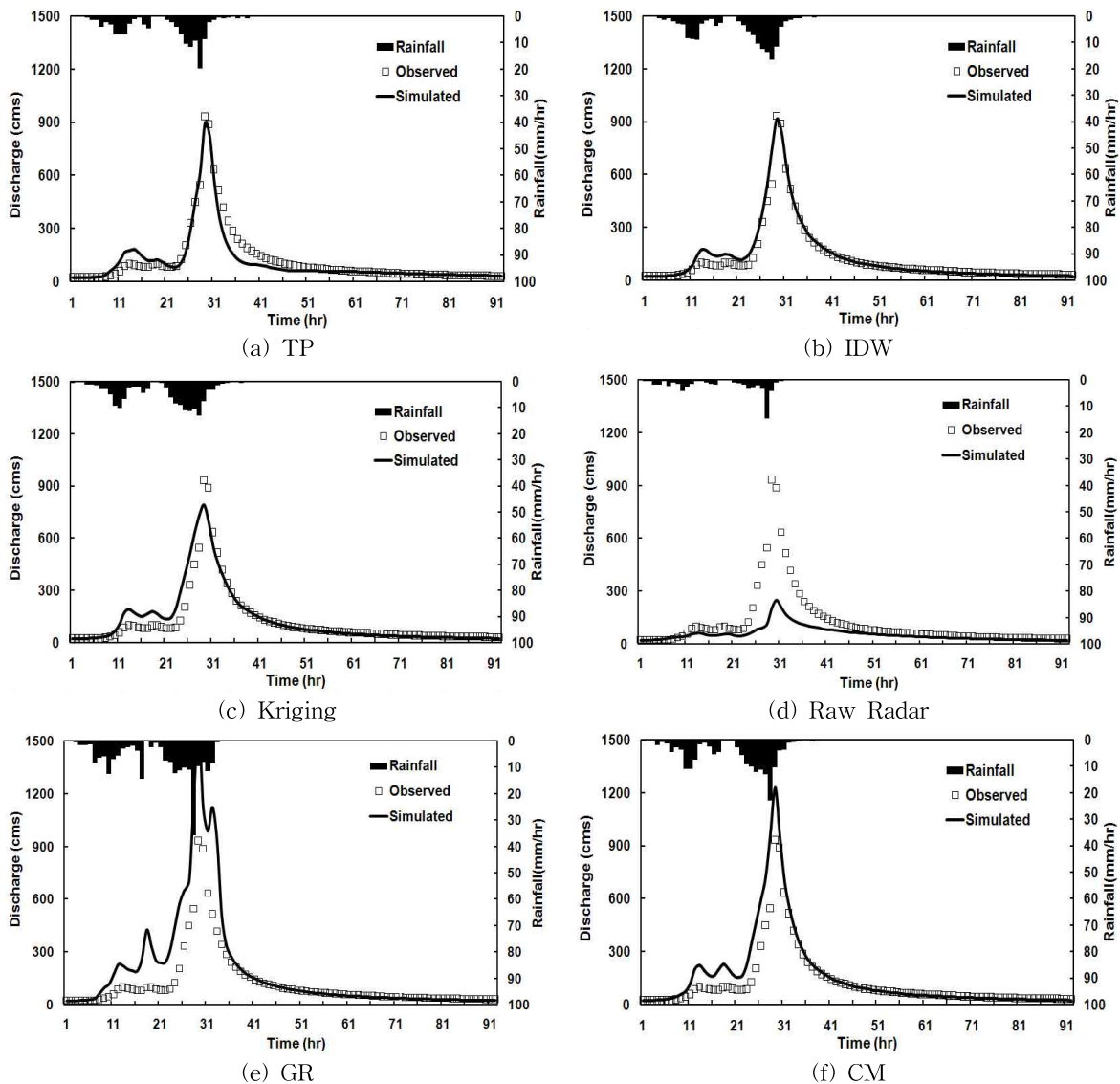


Fig. 5. Rainfall-runoff Simulation Results (Typhoon "Maemi")

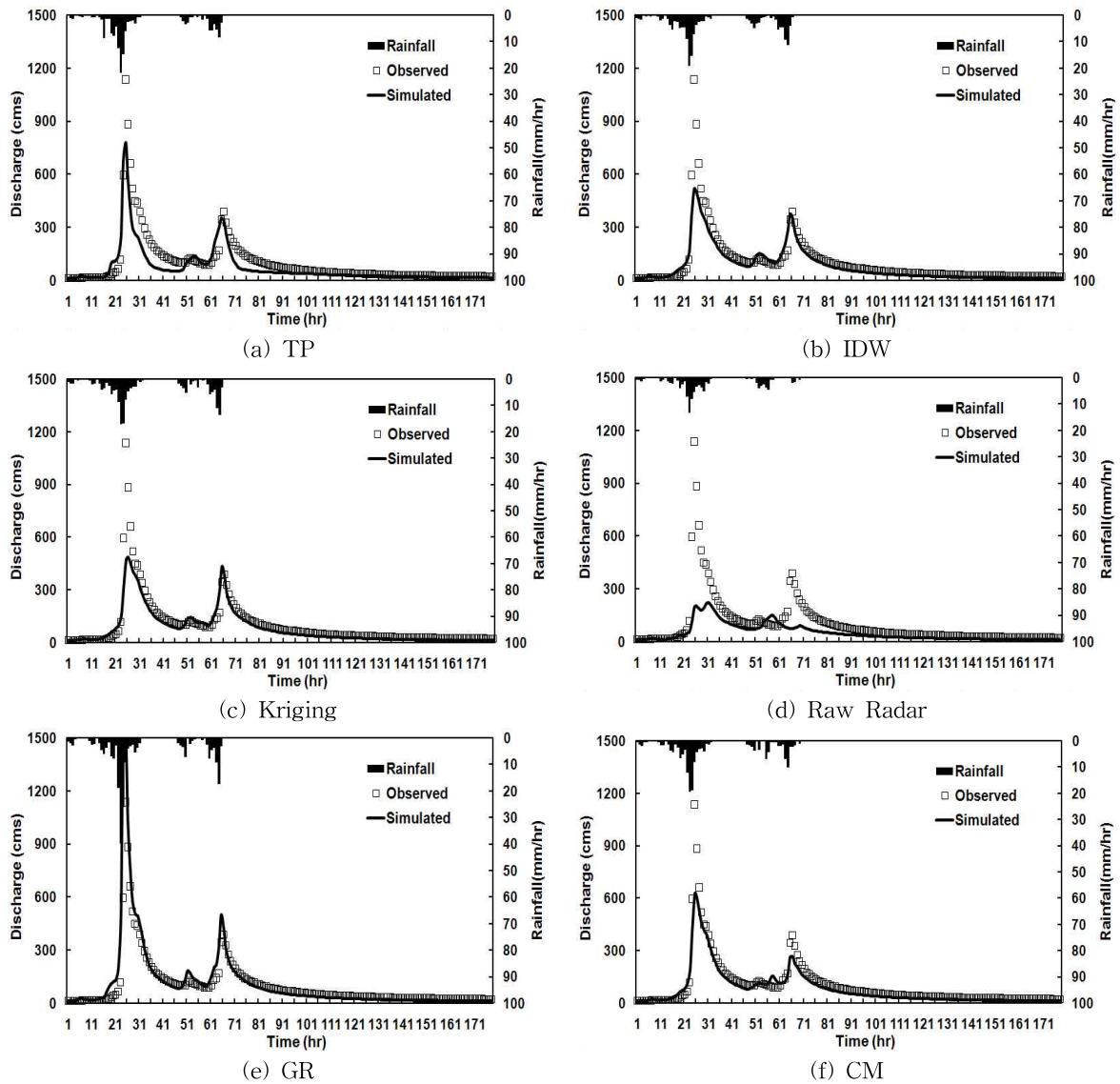


Fig. 6. Rainfall-runoff Simulation Results (Typhoon "Nari")

용한 Kriging 결과와 동일하게 유출모의에서 실제 침투유량 발생시간보다 1시간 이른 시간에 침투유량이 모의되었다.

태풍 "매미"의 강우-유사-유출 모의결과의 경우 실제 관측된 침투시간은 2003년 9월 13일 01시이고, 침투유출량 및 침투유사유출량은  $931.904 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $6038.1 \text{ mg/l}$ 이며, 레이더 강우에 의해 모의된 수문곡선에서 침투시간은 실제보다 1시간 늦게 모의되었지만, 이를 제외한 모든 기법들로 모의된 침투시간이 실제와 일치하였다. 또한, TP와 IDW기법을 이용한 유출모의결과, 재현성이 매우 우수한 것으로 분석되었으나, Kriging기법의 경우 침투유량이 감소하고, GR기법의 경우 강우사상 전반에 걸쳐 유출량이 과다산정되었다. CM기법의 경우 과소산정된 레이더 강우에 비해 모의 유출수문곡선이 개선되었으나 모의된 침

투유량이 관측된 침투유량에 비해 약 30% 과대산정되었으며,  $EI$ 는 0.73으로 분석되었다. 또한 유사유출모의 결과, 모든 기법에서 유출모의결과에 비해 재현성이 낮았으며, CM기법이 가장 우수한 모의결과( $EI=0.80$ )를 도출하였다.

태풍 "나리"의 강우-유사-유출 모의 결과의 경우 실제 관측된 침투시간은 2007년 9월 15일 7시이고, 침투유출량 및 침투유사유출량은  $1134.1 \text{ m}^3/\text{s}$  및  $7160.3 \text{ mg/l}$ 이며, 강우-유출모의 결과, GR을 제외한 모든 기법에서 모의 유출수문곡선이 관측치에 비해 과소산정되었으며, 유사유출모의 결과, Fig. 3(c)에 나타난 바와 같이 지점 강우에 비해 과대산정된 GR기법의 합성강우장에 의해 모의된 유사량 곡선은 침투유사량에 비교적 근접하게 모의된 것으로 판단된다. 반면, 이외의 기법에 의한 유사유출모의 결

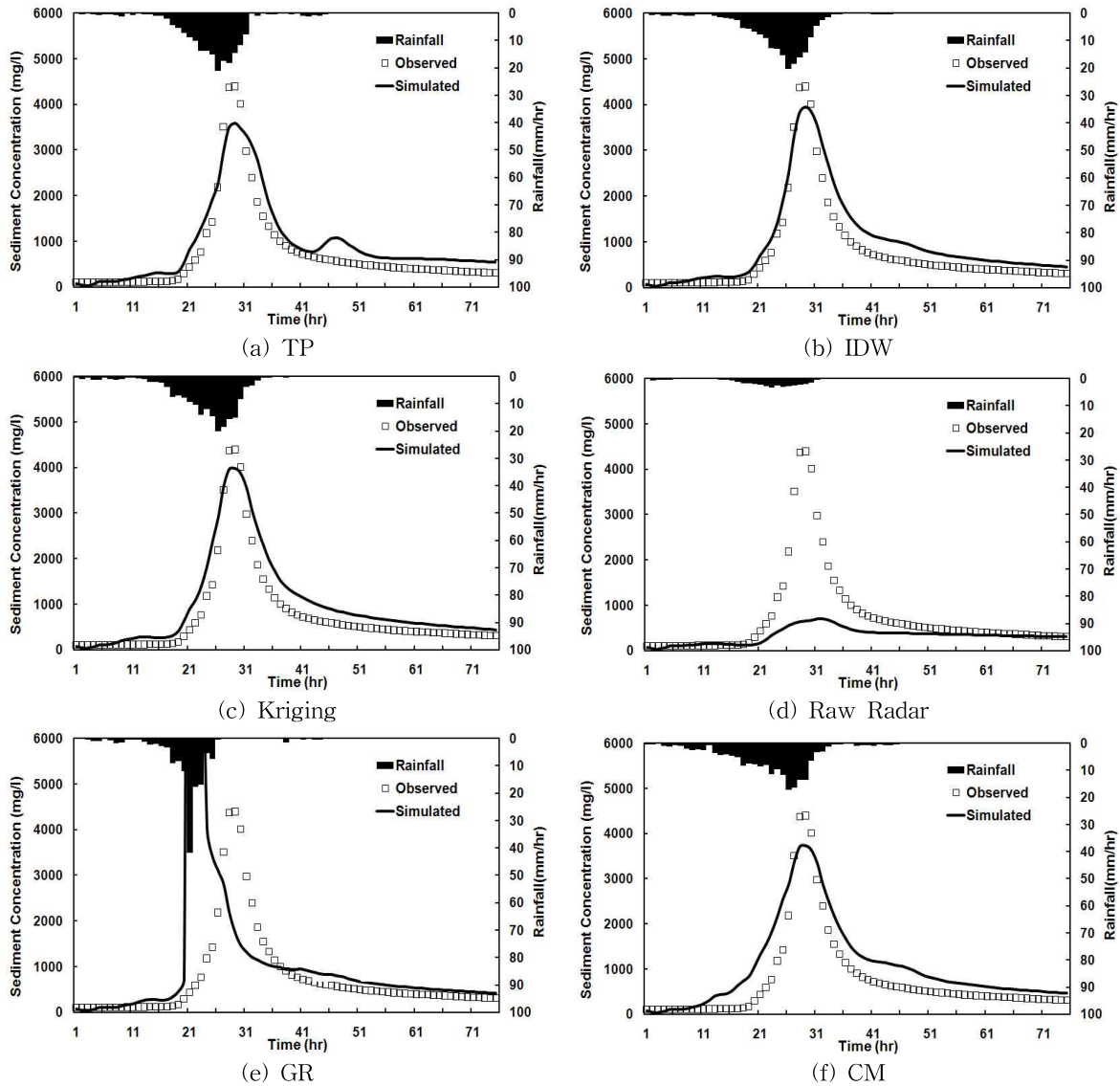


Fig. 7. Rainfall-runoff Simulation Results (Typhoon "Rusa")

과 역시 강우-유출 모의결과와 마찬가지로 과소산정되었으며, CM기법은 가장 우수한 강우-유출( $EI=0.86$ ), 유사유출( $EI=0.70$ ) 모의결과를 제공하였다.

각 기법별 강우-유출-유출 모의를 비교·분석한 결과 지상 우량계를 이용하는 3개의 공간분포 기법들은 비교적 유사한 재현성을 보여주었지만, 원시 레이더 강우는 여전히 과소산정 되어 강우-유출-유출 모의에 보정없이 적용하기에 부적절함을 확인하였다. GR기법의 경우 합성강우장 생성 시 무강우기간이 생기는 오차 또는 지점 강우와 레이더 강우의 상대적 차이로 인한 경중률 오차 등으로 인해 지상 우량계의 분포밀도가 낮은 대상구역에서의 수문모의에 적절치 않음을 확인하였으며, CM기법의 경우 강우-유출-유출 모의에 있어 비교적 우수한 재현성을 나

타냈다. 또한, 강우-유출 모의결과에 비해 유사유출 모의 결과 모든 기법에서 과소산정되었는데, 이는 관측 유량-유사량 관계곡선식 작성 시 사용된 자료분포가 고농도 및 저농도 유사량의 실측자료가 누락된 상태에서 제약적으로 추정됨으로써 발생하는 불확실성이며, 일반적으로 유사유출의 경우 -50~200% 범위의 오차는 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때 적합한 결과라 분석한 바 있다 (Johnson et al., 2000).

#### 4.3 침식 및 퇴적 공간분포 모의 결과

본 연구에서 사용된 모형은 강우 및 지표류에 의한 격자별 침식 및 퇴적에 관한 공간정보를 시간별로 ArcGIS ASCII파일 형태로 제공해주며, 강우기간동안 Eq. (18)의

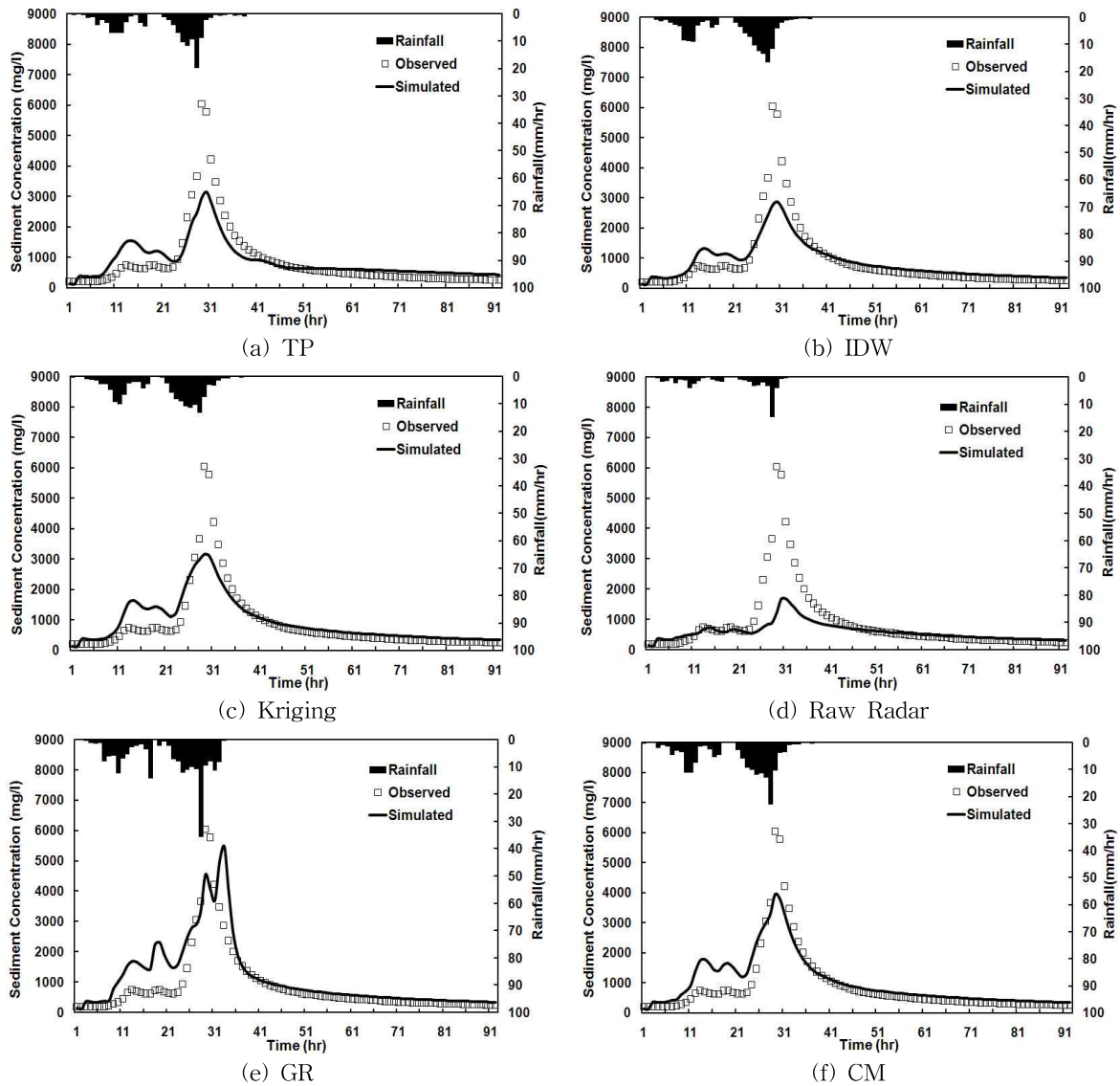


Fig. 8. Sediment Simulation Results (Typhoon "Maemi")

유사이송능력에 의한 침식 및 퇴적에 의한 토사의 공간적 재분배(spatial redistribution of eroded soil)를 고려하여 산정된 3개의 강우사상에 대한 천천 유역에서의 침식 및 퇴적 공간분포는 Figs. 10~12와 같다. 여기서 양(+)의 표시(하얀색 계통)는 침식이 발생한 격자를 나타내며 음(-)의 표시(검은색 계통)는 퇴적이 발생한 격자를 나타낸다.

각 강우사상에 대한 강우장의 공간분포에 따른 격자별 최대침식깊이 및 최대퇴적깊이는 Table 3과 같다. 여기서 주목할 사항은 태풍 "루사"의 모의결과, TP, IDW, CM기법의 경우 최대침식깊이가 약 2cm 미만으로 유사하게 모의된 반면, Kriging의 경우 Fig. 7에서 알 수 있듯이 모의된 유사량 곡선이 매우 유사함에도 불구하고, 최대침식깊이(0.35 cm) 및 최대퇴적깊이(0.39 cm)가 앞선 3개의 기법

모의결과에 비해 상대적으로 작게 도시되었다. 이는 강우의 공간분포에 따른 침식 및 퇴적이 각 기법별로 공간적으로 상이하게 발생하였음에도 유역전체에서 발생한 유사량이 유출구로 이송되는 경우 매우 유사한 유사량 모의결과를 제공할 수 있음을 의미한다. Table 2 및 Figs. 8 and 9의 태풍 "매미", "나리"에서의 유사유출 모의결과에서도 알 수 있듯이 TP와 IDW 기법에서의 침식 및 퇴적분포 역시 유사량곡선의 유사한 시간적 변화에도 불구하고, 대상유역 내에서 공간적으로 상이함을 확인할 수 있다.

원시 레이더 강우에 의한 대상유역내 침식 및 퇴적분포를 살펴보면, 태풍 "루사"의 경우 다른 기법에 비해 상대적으로 작은 강우에 의해 유역전반에 걸쳐 침식 및 퇴적이 적게 발생하였으며, 태풍 "매미"의 경우 Fig. 2(d)에서



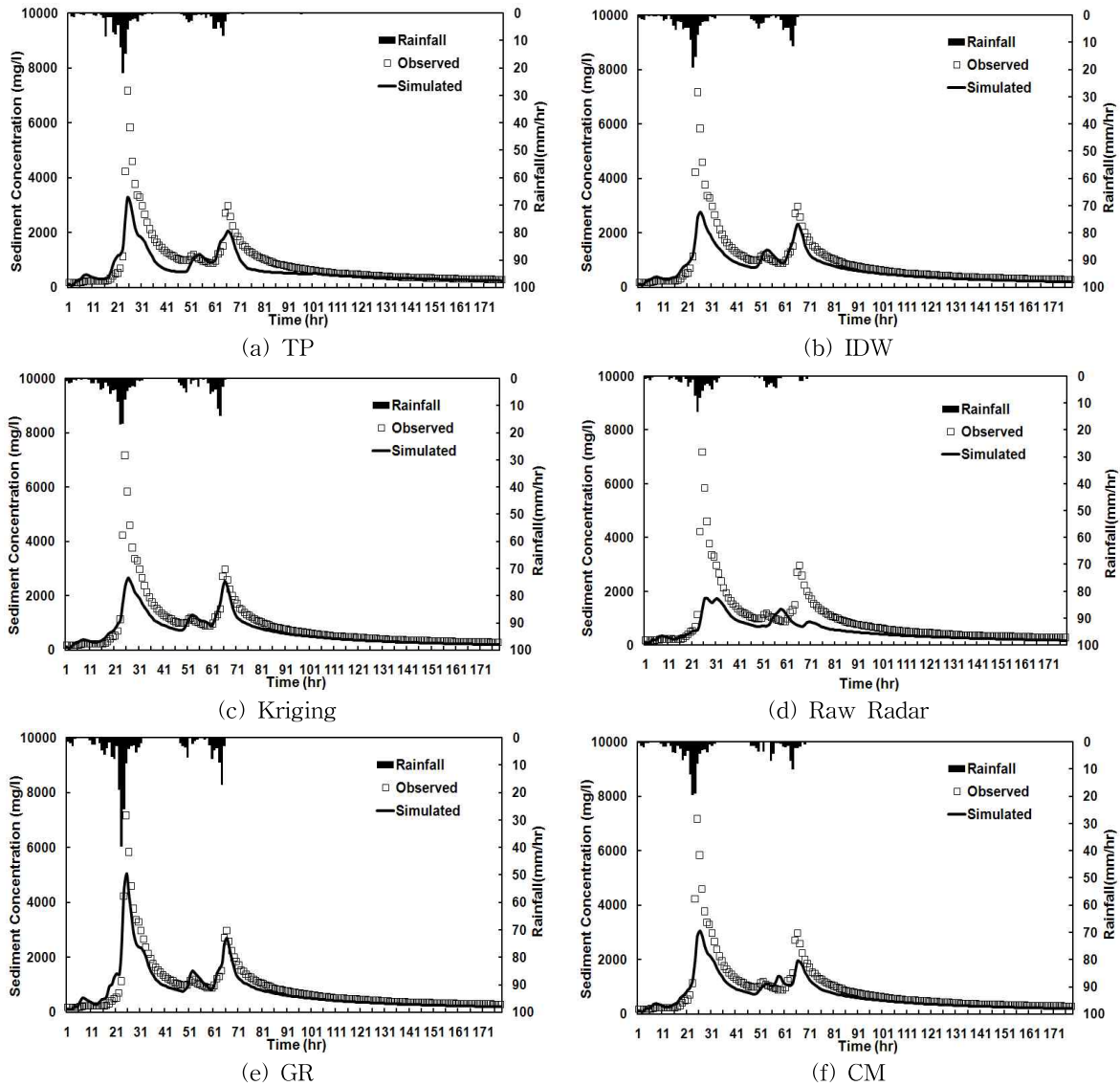


Fig. 9. Sediment Simulation Results (Typhoon "Nari")

알수 있듯이 강우기간동안 내린 총강우량의 편차가 격자별로 상당한 차이(39.8~157.59mm)가 나며, 이로 인해 대상구역의 남서쪽 부근에서 집중적으로 침식이 일어난 반면, 이외에 부분에서는 상대적으로 침식이 작게 발생하였다. 태풍 "나리"의 경우 "루사"와 "매미"에 비해 품질면에서 개선된 레이더 강우자료로 인해 침식 및 퇴적의 공간분포가 비교적 뚜렷이 나타났다.

또한, GR 합성기법으로 계산된 최대침식깊이와 최대 퇴적깊이를 살펴보면, 모든 강우사상에 대하여 과대산정된 강우로 인해 유역전반에 걸쳐 과도한 침식 및 퇴적 현상이 발생하였으며, CM의 경우 강우사상마다 차이는 나지만, 양적으로 지상우량계를 이용한 침식 및 퇴적과 유사한 모의결과를 나타냈으며, 공간적으로도 침식 및 퇴적

양상이 비교적 뚜렷하게 도시되었다.

침식 및 퇴적의 공간분포 형태가 뚜렷이 나타난 Figs. 10~12의 TP, IDW, Kriging, CM기법의 모의결과에서 알수 있듯이 침식은 유역전반에 걸쳐 발생하였으며, 퇴적은 하천주변 격자에서 집중적으로 발생하였다. 이는 본 연구에서 사용된 모형이 지표유출해석을 포화초과지표류(saturation excess overland flow)이론에 근거하여 해석하기 때문에 강우초기에는 하천주변에 부분적으로 지표유출이 발생하여 토양침식이 발생하고, 강우지속기간동안 유출기여면적이 유역전반으로 확대됨에 따라 전 유역에 걸쳐 침식이 발생함을 의미한다. 본 연구에서 사용된 내삽기법 및 합성기법 중 '과연 어떤 기법이 유역의 침식 및 퇴적 양상을 묘사하는데 가장 우수한가?'에 대한 보다

**Table 2. Summary of Rainfall-sediment-runoff Simulation Results**

Event	Method	Runoff Simulation			Sediment Simulation		
		Peak Time	Peak Discharge (m <sup>3</sup> /s)	EI	Peak Time	Peak Sediment (mg/l)	EI
Rusa	<b>Observed</b>	<b>2002/8/31 22:00</b>	<b>1384.7</b>	-	<b>2002/8/31 22:00</b>	<b>4391.3</b>	-
	TP	2002/8/31 22:00	1398.3	0.98	2002/8/31 22:00	3586.6	0.89
	IDW	2002/8/31 22:00	1271.5	0.98	2002/8/31 22:00	3942.0	0.89
	Kriging	2002/8/31 21:00	1323.4	0.96	2002/8/31 22:00	3976.4	0.87
	Radar	2002/8/31 23:00	50.7	-0.133	2002/9/1 01:00	705.4	0.06
	GR	2002/8/31 16:00	1022.8	-0.002	2002/8/31 15:00	28149.7	-21.52
	CM	2002/8/31 21:00	1148.6	0.93	2002/8/31 22:00	3724.7	0.79
Maemi	<b>Observed</b>	<b>2003/9/13 01:00</b>	<b>931.9</b>	-	<b>2003/9/13 01:00</b>	<b>6038.1</b>	-
	TP	2003/9/13 01:00	896.6	0.92	2003/9/13 02:00	3145.1	0.71
	IDW	2003/9/13 01:00	915.8	0.96	2003/9/13 02:00	2875.2	0.72
	Kriging	2003/9/13 01:00	790.0	0.88	2003/9/13 01:00	1487.3	0.36
	Radar	2003/9/13 02:00	249.7	0.27	2003/9/13 03:00	1674.5	0.34
	GR	2003/9/13 01:00	1606.1	0.01	2003/9/13 01:00	4540.3	0.67
	CM	2003/9/13 01:00	1228.5	0.73	2003/9/13 01:00	3945.9	0.80
Nari	<b>Observed</b>	<b>2007/9/15 07:00</b>	<b>1134.1</b>	-	<b>2007/9/15 07:00</b>	<b>7160.3</b>	-
	TP	2007/9/15 07:00	777.0	0.78	2007/9/15 07:00	3277.8	0.67
	IDW	2007/9/15 07:00	517.0	0.79	2007/9/15 08:00	2752.3	0.67
	Kriging	2007/9/15 08:00	485.9	0.77	2007/9/15 08:00	2644.7	0.66
	Radar	2007/9/15 13:00	220.4	0.30	2007/9/15 13:00	1738.0	0.34
	GR	2007/9/15 06:00	1567.4	0.60	2007/9/15 07:00	5035.3	0.88
	CM	2007/9/15 07:00	625.4	0.86	2007/9/15 08:00	3050.1	0.70

**Table 3. Max. and Min. Values of Erosion and Deposition (unit : cm)**

		TP	IDW	Kriging	Raw Radar	GR	CM
Rusa	Erosion	1.55	1.88	0.35	0.16	44.91	1.94
	Deposition	0.69	1.21	0.39	0.11	38.42	1.16
Maemi	Erosion	0.39	0.8	0.14	7.25	89.77	1.16
	Deposition	2.42	0.43	0.16	1.44	79.85	1.12
Nari	Erosion	3.31	0.58	0.6	2.33	16.48	1.24
	Deposition	4.81	0.78	0.76	0.33	11.44	0.72

명확한 해답을 얻기 위해서는 항공사진 분석, 침식 및 퇴적 모니터링을 위한 시험유역운영 등, 모형에서 모의된 침식 및 퇴적 깊이의 공간분포에 대한 실제적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

**5. 결론**

본 연구에서는 강우의 공간특성을 묘사하기 위해 일반

적으로 사용되는 지상 우량계의 강우정보를 기반으로 한 내삽기법 및 지점 강우와 레이더 강우의 합성기법을 이용하여 태풍으로 인한 3개의 강우사상 기간 동안의 시간별 강우장을 생성한 후 각 기법들에 의해 생성된 강우장의 특성을 비교·분석하였다. 또한, 각 기법별로 생성된 공간 분포형 강우자료를 분포형 강우-유사-유출 모형에 적용하여 강우의 공간분포에 따른 유역에서의 수문학적 응답 (hydrologic response)의 변동성 및 침식·퇴적의 공간분



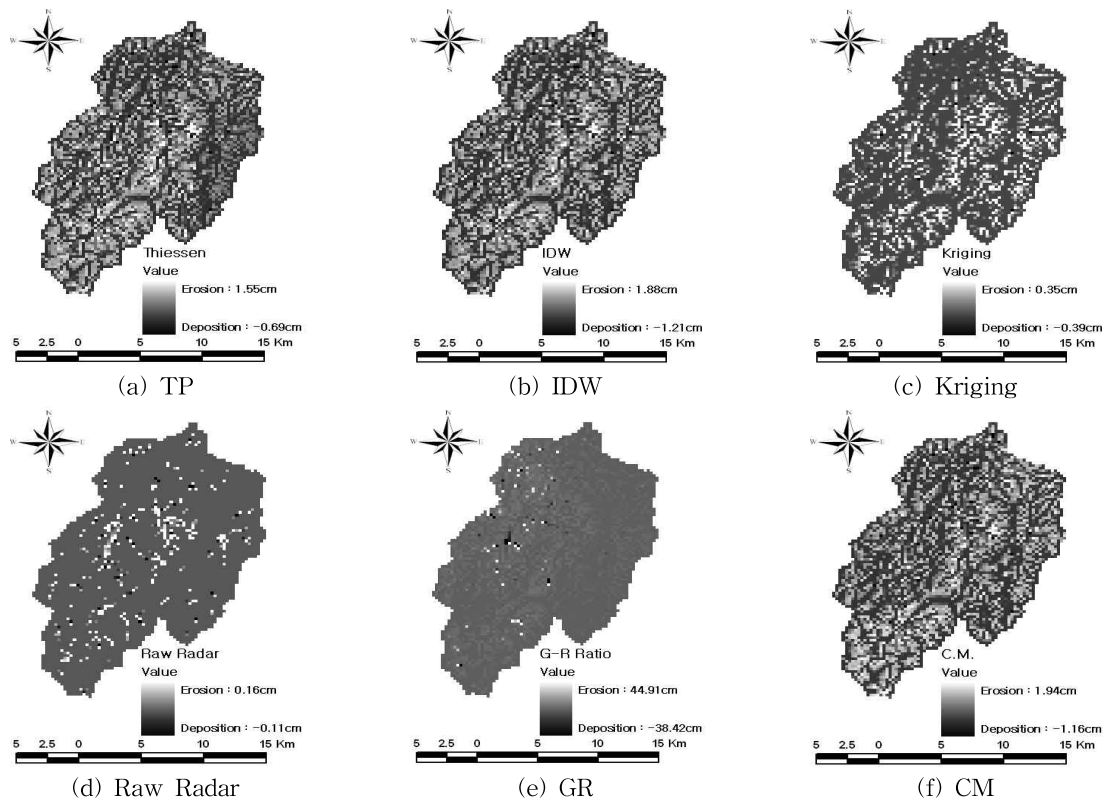


Fig. 10. Spatial Patterns of Erosion and Deposition Due to Rainfall Fields (Typhoon "Rusa")

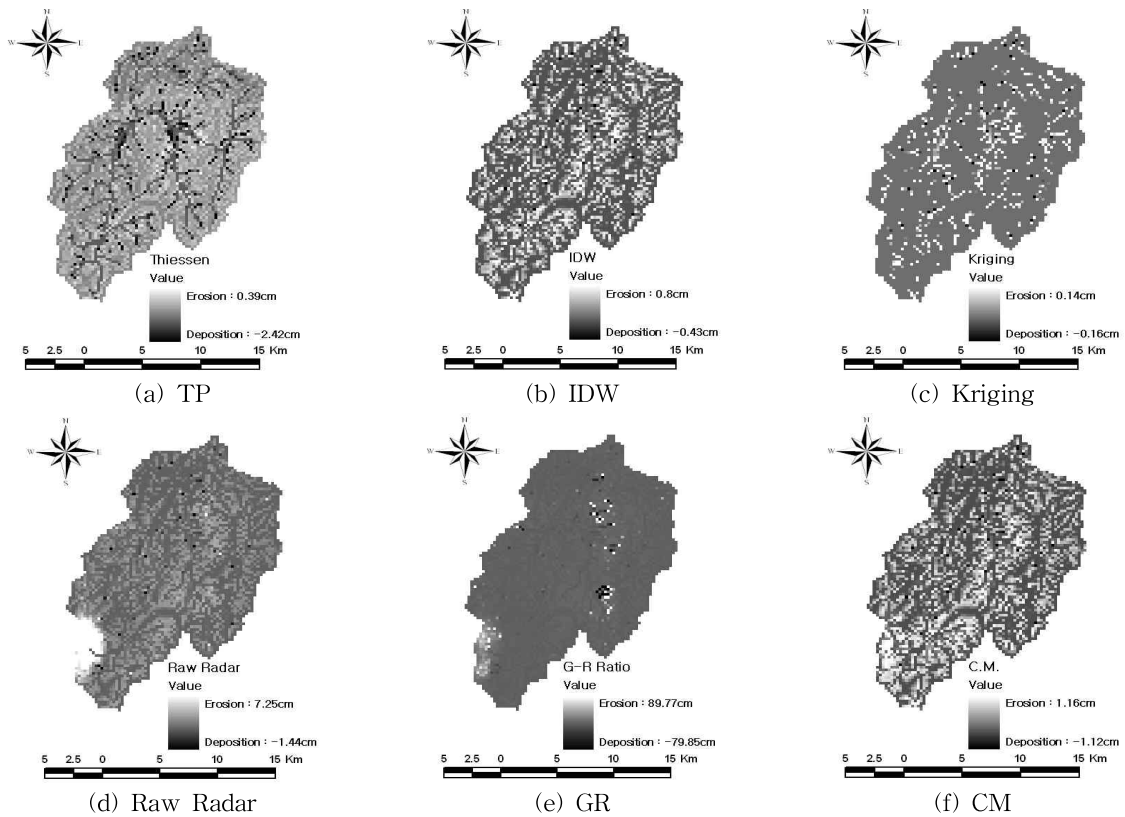


Fig. 11. Spatial Patterns of Erosion and Deposition Due to Rainfall Fields (Typhoon "Maemi")

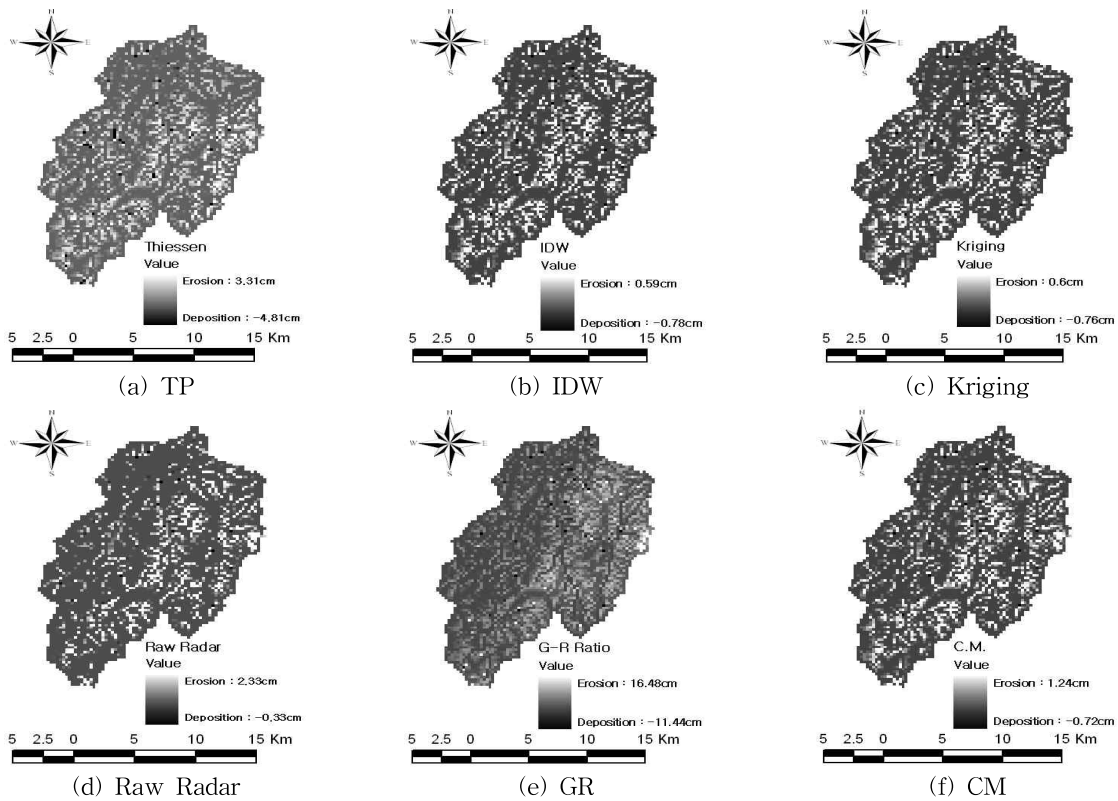


Fig. 12. Spatial Patterns of Erosion and Deposition Due to Rainfall Fields (Typhoon "Nari")

포 양상을 비교·평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 3개의 강우사상에서 각 기법별 면적강우량을 비교 분석한 결과 지상 우량계 강우자료만을 이용한 TP, IDW, Kriging 기법의 경우 기법별로 큰 차이가 없이 유사한 경향을 나타냈으며, 원시 레이더 자료는 지점 강우에 비해 상당히 과소산정 되었고, GR 기법의 경우 지상 우량계가 위치한 격자에서의 레이더 강우와 지점 강우의 상대적 오차로 인해 유역전반에 걸쳐 대부분의 격자에서 과대산정 되었다. 반면, 또 다른 레이더 강우 합성기법인 CM 기법의 모의결과는 지점 강우만을 이용하여 산정된 면적강우량과 비교적 유사한 결과를 보여주었다. 따라서 GR 기법에서 경증률 산정시 필요로 하는 레이더 강우자료의 품질이 비교적 양호할 경우 적용의 간편성 등으로 인해 GR이 유용하나 본 연구에서는 CM 기법에 의해 생성된 합성강우장이 GR 기법에 비해 비교적 우수한 결과를 제공하였다.
- 2) 강우의 공간분포 형태에 따른 강우-유사-유출 모의 결과를 비교 분석한 결과, 면적강우량 산정결과와 마찬가지로 3개의 내삽기법들은 비교적 유사한 재현성을 보였으며, 원시 레이더 강우에 의한 모의 유

량 및 유사량 곡선은 관측값에 비해 상당히 과소산정되었다. 또한 GR 기법의 경우, 무강우 발생 및 과대산정된 경증률로 인하여 수문응답 역시 상당한 불확실성을 나타냈다. 반면에 CM 기법의 경우, GR에 비해 강우-유출 모의에 있어 비교적 우수한 결과를 제공하였으며, 유사유출모의 경우, 유출모의에 비해 재현성이 떨어졌으나 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때 타당한 모의결과로 판단된다.

- 3) 강우의 공간분포 형태에 따른 침식 및 퇴적 양상의 변화에 대한 비교·검토 결과, 비교적 유사한 강우-유사-유출 모의결과를 나타낸 3개의 내삽기법의 경우 침식 및 퇴적의 공간적 분포가 상이하게 발생하였다. 이는 공간적으로 상이하게 발생된 유출 및 유사량이 유역을 통해 유출구로 이송됨에 따라 그 공간적 특성이 둔화되면서 비교적 유사한 수문응답 결과를 나타내는 것으로 판단되며, 이는 유역규모, 강우특성 등 다양한 요소들로 인해 그 결과가 변화할 수 있으므로 이에 대한 후속연구 또한 필요하리라 판단된다. 또한 보정되지 않은 원시 레이더의 경우 지상 우량계를 이용하여 모의한 결과와 매우 상이한 공간분포 특성을 나타냈으며, GR 기법은 수문응답 모의결과와 마찬가

지로 상당히 왜곡된 침식 및 퇴적 분포를 제공한 반면, CM기법의 경우 강우의 공간특성에 따른 유역에서의 침식 및 퇴적 양상을 뚜렷하게 나타냈다.

일반적으로 분포형 모형은 격자기반의 입력자료 구조를 가지고 있으며, 이를 위해서는 모형의 물리적 매개변수 뿐만 아니라 강우 등과 같은 수문학적 입력자료 역시 공간분포형 형태로 구성되어야 한다. 본 연구에서 적용된 레이다 합성기법과 분포형 강우-유사-유출 모형을 이용한 수문응답 변동성 및 침식·퇴적 공간분포 분석의 경우 향후 미계측 유역의 수문모의, 공간단위의 실시간 강우예측을 통한 홍수예보, 임의유역에서의 침식 및 퇴적의 시각화를 통한 취약지역 선별 등과 같이 분포형 수문모형 활용의 가능성을 고려할 때 유용한 도구로서 이용이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단 및 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0006960)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

갈병석 (2008). SWAT모형을 이용한 낙동강 유량 및 부유사량 변동 분석 연구. 석사학위논문, 부산대학교, pp. 51-77.  
 김경준, 최정호, 유철상 (2008). "연속수정법을 이용한 레이다 자료와 지상 강우자료의 합성." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제7호, pp. 681-692.  
 김병수, 김경준, 유철상 (2007). "우량계 강우 자료에 따른 레이다 강우의 지상보정 결과 검토." **한국방재학회 논문집**, 한국방재학회, 제7권, 제4호, pp. 19-29.  
 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현 (2007). "조건부 합성방법을 이용한 레이다 강우와 지상 강우자료의 조합." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 255-265.  
 박진혁, 강부식, 이근상 (2008). "레이더강우를 이용한 GIS 기반의 분포형모형 적용성 분석." **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제16권, 제1호, pp. 23-32.  
 배영혜 (2008). 칼만필터 기법에 의한 레이다강우 보정 및 분포형 모형을 이용한 홍수 유출 모의. 공학석사 학위논문, 인하대학교.

백용, 권오일, 김승현, 구호본(2005). "집중호우시 사면 붕괴의 특성 및 토층 심도와 지하수변동에 따른 사면안정성 해석." **지질공학회는문집**, 지질공학회, 제15권, 제1호, pp. 57-66.

예령, 윤성완, 정세웅 (2008). "대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp. 149-162.

유철상, 박주영 (2008). "가우시안 프로세스 기반 함수근사와 서포트 벡터학습을 이용한 레이다 및 강우계 관측 데이터의 융합." **한국지능시스템학회논문지**, 한국지능시스템학회, 제18권, pp. 297-305.

이근상, 김유리, 예령, 이을래 (2009). "GIS 기반 SWAT모형을 이용한 동향 천천유역의 부유사량 분석." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제12권, 제2호, pp. 82-98.

이기하, 유완식, 장창래, 정관수 (2010). "분포형 수문모형을 이용한 침식 및 퇴적의 시·공간 변동성 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제11호, pp. 995-1009.

정성화, 김경익, 하경자 (2005). "지상 우량계의 강우강도를 이용한 개선된 레이다 강우강도의 실시간 추정." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제5호, pp. 751-762.

정재학, 이종실 (2008). "산지지역 토양침식 방지대책과 향후 과제." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제41권, 제11호, pp. 24-28.

최종근 (2007). 지구통계학. 시그마프레스, pp. 139-149.

홍승진, 김병식, 함창학 (2010). "강우계와 레이다를 이용한 강우의 시공간적인 활용." **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제18권, 제3호, pp. 37-48.

행정자치부 국립방재연구소 (1998). 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(1).

Jetten, V., Govers, G., and Hesse, R. (2003). "Erosion models: quality and spatial predictions." *Hydrological Processes*, 17, pp. 887-990.

Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K., and Watson, C.C. (2000). "The two dimension-upland erosion model CASC2D-SED." *Journal of the AWRA*, Vol. 36, No. 1, pp. 31-42.

Lopes, V.L. (1996). "On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modelling." *Caterza*, No. 28, No. 1, pp. 107-119.

Marshall, J.S., and Palmer, W.McK. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of the Atmosphere Sciences*, Vol. 5, pp. 165-166.

- McLaughlin, D. (2002). "An integrated approach to hydrologic data assimilation: interpolation, smoothing, and filtering." *Advances in Water Resources*, Vol. 25, pp. 1275-1286.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I-A Discussion on principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Saavedra, C. (2005). *Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques*. PhD Dissertation, Wageningen University, Netherland.
- Seo, D.J., Krajewski, W.F., and Bowles, D.S. (1990). "Stochastic interpolation of rainfall data from rain gauges and radar using cokriging: 1. Design of experiments." *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 469-477.
- Shah, S.M.S, O'Connell, P.E., and Hosking, J.R.M. (1996). "Modeling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 2: Experiments with distributed and lumped models." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 89-111.
- Sinclair, S., and Pegram, G. (2005). "Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging." *Atmospheric Science Letters*, pp. 16-22.
- Todini, M. (2001). "A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 5, No. 2, pp. 187-199.
- Yang, C.T. (1972). "Unit Stream Power and sediment transport." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 98, No. HY10, pp. 1805-1826.

논문번호: 12-017	접수: 2012.02.13
수정일자: 2012.04.16/04.18	심사완료: 2012.04.18