

레이더 영상의 수문학적 활용을 위한 벡터 변환방법 연구

A Study on Vector-based Converting Method for Hydrological Application of Rainfall Radar Image

지 계 환* / 오 경 두** / 안 원 식***

Jee, Gye Hwan / Oh, Kyoung Doo / An, Won Sik

Abstract

Among the methods of precipitation data acquisition, a rain gauge station has a distinctive advantage of direct measurement of rainfall itself, but multiple stations should be installed in order to obtain areal precipitation data required for hydrological analysis. On the other hand, a rainfall radar may provide areal distribution of rainfall in real time though it is an indirect measurement of radar echoes on rain drops. Rainfall radars have been shown useful especially for forecasting short-term localized torrential storms that may cause catastrophic flash floods. CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator), which is one of the several types of radar rainfall image data, has been provided on the Internet in real time by Korea Meteorological Administration (KMA). It is one of the most widely available rainfall data in Korea with fairly high level of confidence as it is produced with bias adjustment and quality control procedures by KMA. The objective of this study is to develop an improved way to extract quantitative rainfall data applicable to even very small watersheds from CAPPI using CIVCOM, which is a new image processing method based on a vector-based scheme proposed in this study rather than raster-based schemes proposed by other researchers. This study shows usefulness of CIVCOM through comparison of rainfall data produced by image processing methods including traditional raster-based schemes and a newly proposed vector-based one.

Keywords : areal rainfall, radar, CAPPI, vector-based processing, CIVCOM

요 지

수문학적 해석에 필요한 기본 자료인 강우 자료의 취득 방법 중 지상관측소는 강우량을 직접 관측하기 때문에 실측 강우량 정보를 얻는 장점이 있으나, 현업에서 필요한 면적강우량을 얻기 위해서는 다수의 관측소를 설치해야 하는 단점이 있다. 한편, 강우레이더는 넓은 범위의 강우량을 실시간으로 취득할 수 있으며, 특히 공간적으로 한정되어 발생하는 국지성 돌발홍수의 원인이 되는 단기 집중 호우를 추적하기 용이한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기상청에서 편차 보정과 품질 관리가 이루어지고 있어 상당한 신뢰 수준을 확보하고 있고, 현장에서 쉽게 제공 받을 수 있는 강우레이더 영상인 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) 합성영상으로부터 유역 평균 강우를 추출하는 방법으로서 기존의 연산 방법인 레스터 방식에서 벗어나 소유역에도 적용될 수 있는 벡터 방식의 영상 추출 기법 CIVCOM을 제시하고 추출된 자료의 타당성을 비교 검토하였다.

* 교신저자, 동부엔지니어링 수자원환경부 전무, 수원대 박사과정(e-mail: civilx@dbeng.co.kr)

Corresponding Author, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Suwon

** 육군사관학교 건설환경학과 교수 (e-mail: okd0629@kma.ac.kr)

Professor, Department of Construction Engineering & Environmental Sciences, Korea Military Academy

*** 수원대학교 토목공학과 명예교수 (e-mail: wsan@suwon.ac.kr)

Emeritus Professor, Department of Civil Engineering, University of Suwon

1. 서론

중·단기간에 발생하는 호우사상에 대한 유출해석은 도시지역의 치수적 안전성 확보 측면에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있으며, 최근에는 이와 같은 돌발홍수를 예측하기 위해서 강우레이더의 활용성이 더욱 강조되고 있다. 지상우량계는 실제 강우에 가까운 지점(point) 자료를 제공하지만, 일반적으로 성긴 강우관측망으로 인하여 강우의 공간적 특성을 파악하는데 한계가 있으며, 특히 강우의 변동성이 더욱 커지는 산악지역에서 관측망의 밀도가 작아지는 문제점이 있다. 반면 레이더는 넓은 지역에 걸쳐 실시간으로 강수현상을 감시하고 지상우량계로는 파악이 불가능한 우량계 틈새로 통과하는 국지적인 호우나 강우 이동 및 강우 상황 등의 파악이 가능하다. 아울러 다양한 강수 패턴이나 정보를 얻는데도 뛰어난 성능을 가지고 있다(건설교통부, 2004; 석미경 등, 2005; 원익근, 1995; Ha and North, 1994; Ha et al., 2002). 그러나 레이더 관측은 레이더가 지상으로부터 일정한 높이의 대기 중에서 전자기파의 반사 및 감쇄 특성을 이용하여 강우강도를 간접적으로 추정하기 때문에 강우량과는 직접적인 선형관계를 보이지 않는다(Jessen et al., 2005). 즉, 강우레이더 자체만으로 강우를 정량화하고, 수문학적 유출해석을 수행하기에는 한계가 있다. 이로 인해 레이더 강우와 지상우량계와의 합성을 통해 지상우량계 수준의 레이더 강우를 얻고자 하는 연구(정성화 등, 2005; Kitchen and Blackall, 1992; Anagnostou et al., 1998; Seo, 1998) 및 레이더 강우의 지상 보정(ground-truth)과 관련된 연구(Ha and North, 1999; Ha et al., 2002; 유철상, 2007)가 활발히 진행 중이며, 좋은 성과를 거두고 있다. 그러나 정확한 레이더 강우 자료라 하더라도 수문학적으로 활용하기 위하여 면적강우량으로 산정 시 소유역에서 자료의 편차가 심하게 발생하는 문제점이 발견되었다. 이는 기존의 방법이 레스터 방식에 기반하고 있어서 픽셀의 크기와 연산 방법에 따른 오차가 상쇄되는 대유역에 적용하기에는 문제가 없으나(이원근, 2010), 픽셀 수준의 소유역에는 적용하기 어려운 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 레이더 강우의 실무 활용을 위하여, 현장에서 쉽게 취득 할 수 있는 강우 레이더 자료인 CAPPI 영상을 벡터 기반으로 처리하는 기법인 ‘CAPPI 영상 벡터 처리 기법’(CIVCOM,

CAPPI Image Vector-based COnverting Method)을 개발함으로써 소유역에서도 레이더 영상을 실시간으로 수치화하여 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 또한 현재 일반적으로 사용하고 있는 레스터 기반 영상처리 기법에 의한 강우량과 본 연구에서 제안한 벡터 기반 영상처리기법에 의한 강우량을 비교·검토하여 두 기법간의 차이점을 고찰하였으며, CIVCOM 및 지상관측망으로 얻어진 면적강우량을 각각 강우유출해석에 적용하여 그 결과를 비교검토함으로써 CIVCOM 모형을 활용한 면적강우량산정결과의 적정성도 검토하였다.

2. 레이더 강우에 관한 연구동향

우리나라의 강우레이더는 1968년 서울 관악산에 처음 설치되었고, 현재까지 수문학자와 실무자들에 의해 활발한 연구가 이루어지면서 지속적으로 많은 발전을 하였다. 기존의 연구들은 레이더 빔 반사도와 같은 디지털 원시자료로부터 각종 편차를 보정하고 빔 반사도와 강우강도간의 관계규명을 위한 연구가 주를 이루고 있으며, 특히 기상연구소(1996)는 레이더 자료를 이용한 강수량 추정을 위해서 레이더 자료의 품질검사 과정에 관한 연구를 하였다. 그러나 최근에는 레이더 강우를 수문학 자료로 활용하기 위한 면적강우량 추정에 관한 연구가 활발히 이뤄지고 있으며, 이와 관련한 연구로서 정성화 등(2005)은 레이더 강우강도를 실시간 보정하는 방법을 사용하여 면적강우량을 추정하였으며, 김병식 등(2007)은 조건부 합성기법을 이용하여 레이더 강우와 지상강우를 추정하고 면적강우량을 산정하였다. 또한, 배영혜(2008)는 레이더 강우를 이용하여 시공간적 변동성을 고려한 격자형 면적 강우량을 산정하기 위하여 추계학적 방법인 칼만필터 기법을 이용하여 지상 강우과 레이더 강우를 조합하여 면적 강우량을 산정하였다. 김광섭 등(2008)은 칼만필터 기법을 이용한 실시간 레이더 강수량산정이 계산시간이 여타 기법보다 많이 소요되어 실시간으로 적용하기에 어려운 문제점을 개선하기 위하여 실시간 weight mask를 이용한 면적강우 산정 방법을 제시하였으며, 김영일 등(2009)은 인공신경망을 이용한 레이더 면적강우량이 티센망을 이용한 면적강우량에 비하여 더 신뢰성 있는 결과라고 제시하였다. 한편, 레이더 영상으로부터 강우를 수치화하는 방법으

로는 오경두 등(2008)이 기상청 실시간 레이더 강우 영상이 여러 가지 필요한 편차 보정과 빔 반사도-강우강도 관계식을 적용한 최종 산출물로서 상당한 신뢰수준을 확보하고 있다는 점에 주목하여 레이더 강우 영상을 직접 디지털 강우자료로 변환하는 레스터 기반 영상처리기법(RAIDOM)을 개발한 바 있고, 박규남(2009)은 기상청에서 제공하는 합성 CAPPI를 이용하여 미세측 유역에서의 강우량을 추출할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그러나 CAPPI영상을 이용한 면적강우량 산정 시 자료 처리방식에 따른 오차발생과 이의 개선을 위한 기법개발에 대한 연구는 이뤄지지 않았다.

3. 강우 레이더 영상(CAPPI)의 벡터변환 방법

본 연구에 이용된 CAPPI 영상은 강우의 발생유무를 판단하기에 적합한 고도로 알려져 있는 관측고도 1.50 km에 대한 레이더 합성 영상이다. PPI (Plan Position Indicator)는 극좌표계에서 하나의 고도각으로 일정하게 고정시킨 상태에서 수평방향으로 회전하여 나타나는 레이더에코의 영상을 의미하며, 고도각에 관계없이 등고도면에 대해 나타낸 것이 CAPPI 영상이다. 우리나라 기상청에서는 보정 빔 반사도와 강우강도간의 관계식을 적용한 CAPPI 영상을 인터넷을 통하여 비손실 그래픽 파일 포맷인 PNG (Portable Network Graphics) 이미지 파일 형태로 10분 간격으로 최근 10일치까지 제공하고 있으며, Fig. 1은 기상청의 CAPPI 영상을 나타낸 것이다. 그런데 이러한 CAPPI 레이더 영상은 이미지 형태이기 때문에 수문학 분야에 활용하기 위해서는 수치 데이터화하는 과정이 필요하다.

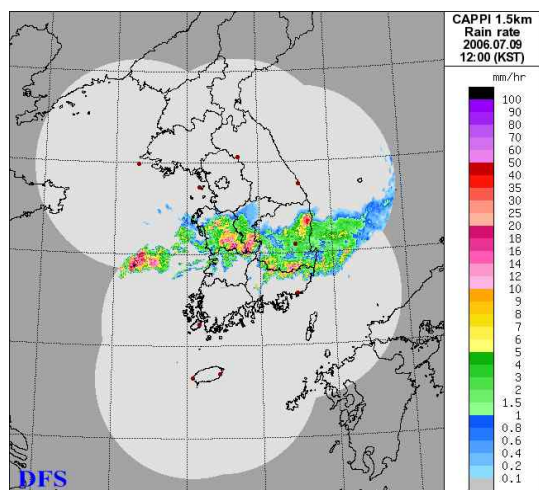


Fig. 1. CAPPI of Korea Meteorological Administration

3.1 수치데이터화를 위한 영상처리 방법

유역과 강우영상을 중첩하여 특정 지점의 강우량 속성 정보를 추출함에 있어서는 GIS 기반의 공간분석방법과 이미지 연산 기법들이 활용되고 있다. 실세계의 지리공간을 추상화하여 표현하는 방법은 이산 객체에 기반을 둔 모델인 벡터 모델과 필드에 기반을 둔 레스터 모델의 두 방법이 있으며, Fig. 2는 레스터 모델의 표현 방식을 나타낸 것이고, Fig. 3은 벡터와 레스터간 공간영역의 표현 방식을 비교한 것이다.

3.1.1 레스터 기반 영상처리

레스터 자료의 가장 간단한 표현구조는 그리드(Grid), 셀(Cell) 또는 픽셀(Pixel)로 구성된 배열이다. 각 셀의 위치정보는 배열의 행과 열을 구성하며, 지도화되는 속성의 값이나 유형을 나타내는 수치로 표현된다. 레스터 구조에서 점은 하나의 셀로 표현되며, 선은 일정한 방향으로 배열되어 인접하고 있는 셀의 집합으로 표현되고, 면은 사방으로 인접하고 있는 셀의 집합으로 표현된다. 이러한 자료구조는 행과 열의 배열을 쉽게 저장, 조작하고 표현할 수 있다는 장점은 있으나, 표현되는 사상에 비해 셀의 크기가 클 때 자료의 정밀도가 떨어지는 단점이 있다.

어떤 공간 영역에 대한 레스터의 영상처리값은 특정 값을 갖는 픽셀 개수와 픽셀의 값을 곱하여 더한 값이다. 레스터 연산에 있어서 영상의 최소 단위인 픽셀의 개수를 결정하는 방법으로 픽셀의 50% 이상을 차지하는 최대 점유치 방법과 중심점의 포함여부로 판단하는 중심치 방법을 주로 사용하고 있으며, Fig. 4는 레스터방식의 영상처리를 위한 최대 점유치 방법과 중심치 방법을 비교한 것

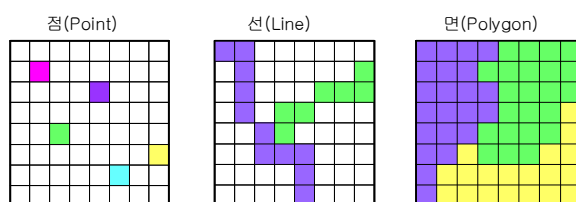


Fig. 2. Raster-based Schemes

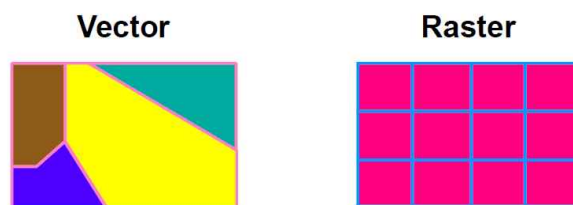


Fig. 3. Comparison of Raster and Vector

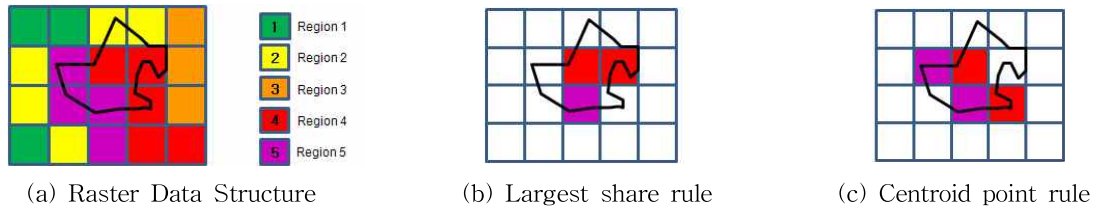


Fig. 4. GeoProcessing Method of Raster-based Schemes

으로, 각각의 레스터 연산 수행과정은 다음과 같이 기술할 수 있다.

우선, 영상을 (4.5)의 배열로 표현하여, 좌상단 위치를 (1,1)로 정하면, (1,3)과 (1,4)의 영상픽셀은 공간영역에서 차지하는 비율이 모두 50% 미만으로써 포함되는 비율이 포함되지 않은 비율보다 작다. (2,3), (2,4), (3,3)의 경우 모두 50% 이상으로 포함되는 비율이 더 크나, (2,2), (3,2)와 (3,4)의 비율은 작아서 최대 점유치 방법으로 영상처리를 하면, Fig. 4의 (a)와 같은 결과를 얻게 된다. 중심치 방법으로 연산하는 경우 (2,2)는 중심 위치가 유역 경계선 내에 포함되어 있고 역시 (3,4)도 포함비율은 적으나, 중심 위치가 영역 내 포함되어 있어, 중심치 영상처리를 하면 Fig. 4의 (b)와 같은 결과를 얻게 되며, Eq. (1)은 레스터 기반 영상처리 시 면적강우량을 나타낸다.

$$P_A = \sum_{i=1}^n N_i \times P_i \quad (1)$$

여기서, P_A 는 A유역의 면적강우량, N_i 는 i번째 그리드 픽셀의 기여도(0 또는 1), P_i 는 i번째 그리드 픽셀의 속성값(강우량)이다.

상기와 같이 레스터방식을 이용하여 CAPPI 영상으로부터 유역에 대한 면적강우량을 산정하는 경우에는 실제 유역의 형상을 정확하게 표현하지 못함에 따른 오차가 예상되고, 또한 레스터자료를 처리하는 방법에 따라라도 산정된 값이 상이하게 나타나게 된다. 특히, 이러한 오차는 유역의 경계에 단위 격자가 많이 놓이게 되는 소유역으로 갈수록 커지게 되며, 영상처리를 위한 격자의 크기가 클수록 커지게 된다.

3.1.2 벡터 기반 영상처리

벡터 모델은 실제계에 나타나는 다양한 대상물이나 현상을 점, 선, 다각형을 이용하여 표현하는 것으로 객체들의 지리적 위치를 방향성과 크기로 나타낸다. 점은 하나의 좌표와 속성정보로 구성되며, 선은 두 개의 노드(node)와 이를 연결하는 선으로 구성되고, 연속적인 선은 끝에

위치한 두 개의 노드와 꼭지점(vertex)들의 연결로 나타낸다. 면은 하나의 노드와 꼭지점들이 연결되어 있으며, 시작점과 끝점이 하나의 노드에서 만나 폐합을 이룬다. 면은 모양, 둘레, 면적을 가진다. 이런 위상관계를 이용하여 이들 점, 선, 면 객체들간의 공간 관계를 파악할 수 있으며, 다양한 공간 분석 기능을 수행할 수 있다. Fig. 5는 두 벡터 레이어를 중첩하여 교차(intersect)하는 영역을 새로운 레이어로 생성하는 연산 과정을 나타낸 것이다. 앞서 레스터 기반 영상처리에서 1에서 5까지의 속성값을 가지는 픽셀 각각을 하나의 면 객체로 간주하여 20개의 면으로 구성된 벡터 레이어로 만들고, 다각형으로 표현되는 유역 경계선도 벡터화하여 두 레이어간에 벡터 연산 처리함으로써 레스터 영상처리 보다 더 정확한 값을 얻을 수 있으며, Figs. 5~6은 이를 모식화한 것이고, Eq. (2)는 벡터기반 영상처리 시 면적 강우량을 나타낸다.

$$P_A = \sum_{i=1}^n P_i \times R_{vi} \quad (2)$$

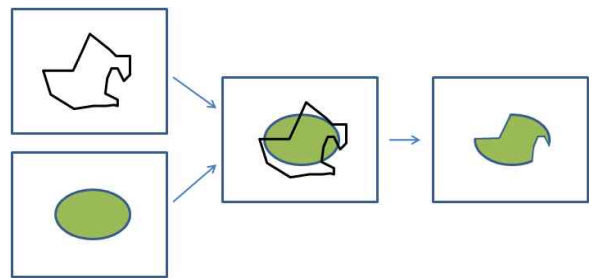


Fig. 5. Intersection Operations of Vector-based

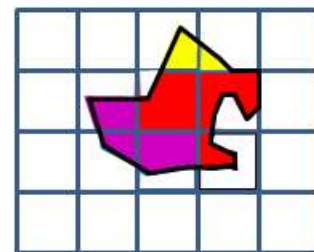


Fig. 6. Results of Vector-based

여기서, P_A 는 A 유역의 면적강우량, P_i 는 i 번째 그리드 픽셀의 속성값(강우량), R_{vi} 는 i 번째 그리드 내에 포함된 A 유역의 면적비이다.

이와 같이 벡터방식을 이용하여 CAPPI 영상으로부터 유역에 대한 면적강우량을 산정하는 경우는 실제 유역의 형상을 정확하게 표현함에 따라 기존 레스터방식에서 발생하는 영상처리방법에 따른 오차를 제거할 수 있으며, 유역면적이 작은 중소하천에 대해 CAPPI 영상을 적용하는 경우에 보다 정확한 강수량의 산정과 이를 토대로 한 홍수예보가 가능하다.

3.2 CIVCOM 영상처리모형 개발

CAPPI 레이더 영상을 수문학 분야에 활용하기 위해서는 수치 데이터로 변환하는 과정이 필요하다. 현재 실무에서는 상용 프로그램에서 제공하는 함수만을 사용하여 수치 데이터화하고 있으며, 이 경우 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, CAPPI의 영상 포맷인 PNG 파일을 레스터 기반의 그리드 파일로 변환하여 처리하는 과정에서 원본 자료의 손실이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CAPPI 영상의 정보 손실이 최소화되도록 벡터 기반의 영

상 처리 기법인 CIVCOM (CAPPI Image Vector-based Converting Method)을 개발하였다. 본 CIVCOM 모형은 CAPPI 전처리모듈, CAPPI 벡터처리모듈과 유역평균강우량 산정모듈 등 3개의 모듈로 구성되어 있으며, Fig. 7은 CIVCOM 모형의 메인모듈화면과 레이더 강우영상의 수치화과정을 나타낸 것이다.

3.2.1 CAPPI 전처리모듈

기상청에서 제공되는 레이더 강우영상은 레스터 기반의 자료로서 강우 정보뿐만 아니라 이러한 강우 정보를 나타내는 픽셀의 색상 정보와 함께 위경도 구분선, 영역 경계선, 해안선 및 기상관측소의 위치와 기준 색상 범례 표 등을 포함하고 있다.

이러한 요소들은 영상 내에서 강우량을 나타내는 색상 정보와 중복되는 경우가 발생하여 특정 위치에 대한 강우량 결과 값을 부정확하게 하는 원인이 된다. 따라서 제거 대상 요소에 해당하는 픽셀은 제거하고, 정보가 누락된 픽셀은 내삽 보완하는 전처리 과정을 수행하여야 하며, Fig. 8은 CAPPI 영상 전처리절차에 따른 영상처리 과정을 제시한 것이다.

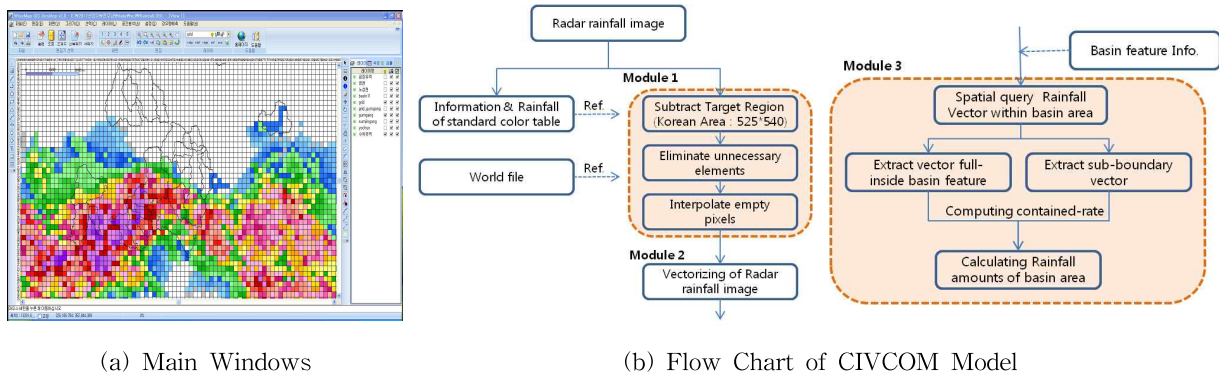


Fig. 7. CIVCOM Model

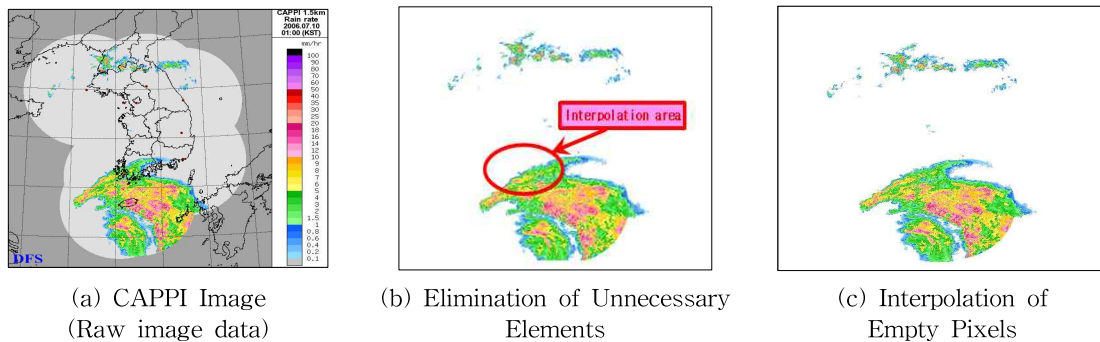


Fig. 8. Preprocessing of CAPPI Image

3.2.2 CAPPI 벡터처리모듈

CAPPI 영상을 전처리 과정을 통하여 보정한 후 강우 영상으로부터 GIS 기반의 강우수치데이터를 생성하기 위해 먼저 강우영상과 동일한 크기의 격자체계를 구성하고, 격자를 구성하는 각 셀과 강우영상의 픽셀 간에 1:1 매핑을 통하여 각 픽셀에 정의된 색상 값의 R, G, B 구성정보를 매핑되는 격자의 속성데이터 필드 값으로 저장한다. 이러한 과정을 강우영상을 구성하는 모든 픽셀에 대하여 반복 수행하여 새로운 수치데이터를 갖는 강우량 격자를 생성한다. 강우영상은 525*540의 픽셀로 구성되어 있으며, CAPPI 영상의 PNG 생성 시 하나의 픽셀은 실제계 공간에서의 X좌표 길이가 2063.65m, Y 좌표는 2020.40m로서 정방향의 격자가 아닌 직사각형 형태이다. 이를 기존 방법과 같이 정사각형 레스터 그리드 데이터로 변환 할 경우 강우영상 픽셀 고유의 값이 손실되므로, 본 연구에서는 직사각형의 벡터 폴리곤으로 변환한다. Fig. 9는 CAPPI

영상에 대한 벡터처리 절차를 나타낸 것이며, Table 1은 기준색상범례에 정의된 강우량과, 그와 관계되는 색상 값의 Red, Green, Blue 속성정보를 나타낸 것이다.

3.2.3 유역평균강우량 산정모듈

전처리 과정과 벡터화 과정을 거친 레이더 강우 영상으로부터 유역의 면적강우량을 얻기 위해서는 강우 수치데이터와 유역 공간 데이터 간에 GIS 기반의 벡터 공간연산을 수행하여야 한다. 면적강우량 산정을 위한 벡터 공간연산은 폴리곤 형태의 유역 공간객체와 직사각형 격자 형태의 강우 공간객체 간에 지리적 공간 연산을 수행하여 유역 내 면적강우량을 산정하는 절차이다. 이를 위해서는 격자화된 강우 객체가 유역 내에 완전 포함되는 경우와 부분 포함되는 경우의 영역 포함비율을 산출하고, 각 객체에 정의 되어 있는 강우 값을 영역 포함비율과 곱하여 더하는 연산을 수행한다. 이를 다시 전체 포함비율의 합으로 나누어 유역의 평균강우를 산출한다. Fig. 10은 벡터

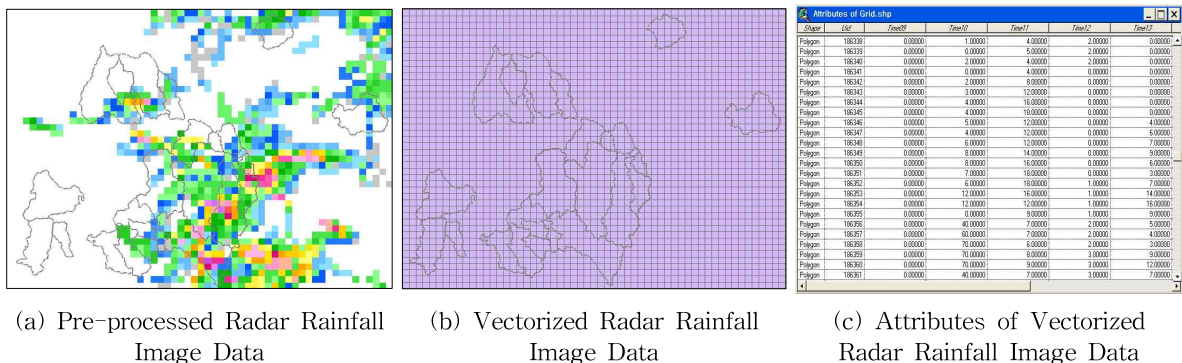


Fig. 9. Vectorizing of Radar Rainfall Image Data

Table 1. RGB Color Values for Rainfall Intensities

Rainfall (mm/h)	Red	Green	Blue	Rainfall (mm/h)	Red	Green	Blue	Rainfall (mm/h)	Red	Green	Blue
0.1	196	196	196	6	255	255	115	30	255	150	130
0.2	140	220	255	7	255	240	75	35	255	90	80
0.4	110	190	255	8	245	225	10	40	255	20	10
0.6	76	160	255	9	255	200	10	50	200	0	0
0.8	35	120	255	10	255	165	5	60	238	130	240
1	13	90	255	12	255	180	230	70	210	112	241
1.5	140	255	140	14	255	153	203	80	186	85	245
2	110	240	110	16	255	90	180	90	160	32	245
3	75	225	75	18	235	50	150	100	148	0	251
4	40	206	40	20	215	15	114				
5	10	180	10	25	255	180	156				

공간연산을 수행하여 산출한 영역 포함비율을 색으로 구분 표시하였으며. 그림의 테이블은 CIVCOM 기법에 의하여 각 격자마다 시간별로 계산된 강우량 수치값을 나타낸 것이다.

4. CIVCOM 모형의 적용

4.1 대상 유역 및 호우사상 선정

4.1.1 대상 유역 선정

본 연구에서 개발한 CIVCOM 모형의 적용성을 검토하기 위해 금강권역의 갑천유역을 대상유역으로 선정하였다. 갑천 유역의 면적은 648.87 km²로 금강 전체 유역의 약 7%를 차지하고 있다. 갑천은 총 유로연장 73.70 km 중 국가하천구간이 33.53 km로, 유등천 포함 2개소의 국가하천, 30개소의 지방하천 등 총 32개소의 법정하천이 있다. 본 연구에서는 갑천유역내 총 32개의 법정하천 중에서 중

소규모 유역이 고루 분포되도록 12개의 하천 유역을 선정하여 CIVCOM 모형을 이용한 유역평균강우량을 산정하였으며, Table 2는 본 연구에서 적용한 갑천유역내 하천 현황을 나타낸 것이다.

4.1.2 호우사상 선정

본 연구에서 개발한 CIVCOM 모형의 적용성을 검토하기 위한 강우사상은 갑천유역 전방에 걸쳐 발생한 2006년 태풍 에위니아(2006년 7월 8일 1시~2006년 7월 9일 24시)로 선정하였으며, 본 강우사상에 대한 CAPPI 자료는 30분 간격으로 구축하였고, Fig. 11은 본 연구에 적용된 CAPPI 자료의 일부를 나타낸 것이다.

4.2 레이더 영상을 이용한 강우량 산정

4.2.1 레스터 연산 기반의 강우량 산정

대상유역인 갑천유역에 대해 태풍 에위니아시 CAPPI

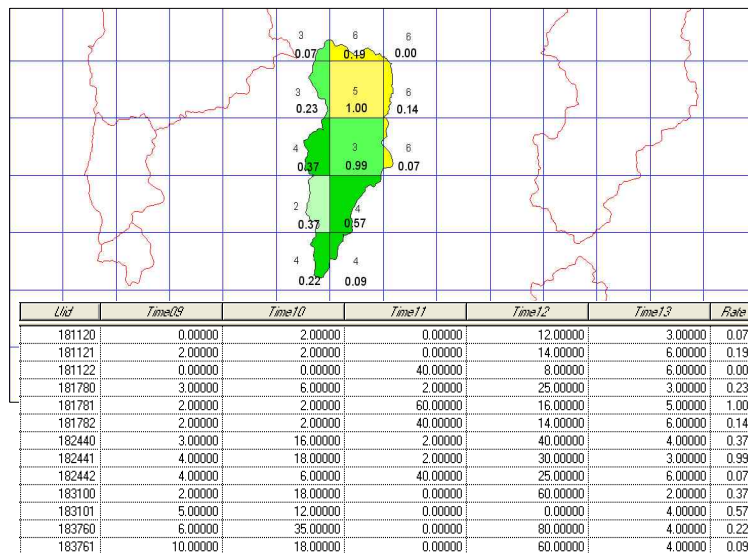


Fig. 10. Computational Procedures of Areal Radar Rainfall by CIVCOM

Table 2. Geomorphic Features of the Rivers Studied in this Research

River	Length (km)	Area (km ²)	River	Length (km)	Area (km ²)
Gumchun-Cheon	4.77	8.71	Banseak-Cheon	7.56	15.60
Gwarye-Cheon	2.50	7.48	Ahgok-Cheon	3.60	2.39
Kumseung-Cheon	5.20	11.82	Jinjam-Cheon	8.60	26.38
Daejeon-Cheon	11.59	87.82	Tandong-Cheon	8.75	20.77
Dooye-Cheon	21.40	69.70	Youdeung-Cheon	44.40	289.14
Maenoe-Cheon	10.27	17.62	Gab-Cheon	73.70	648.87

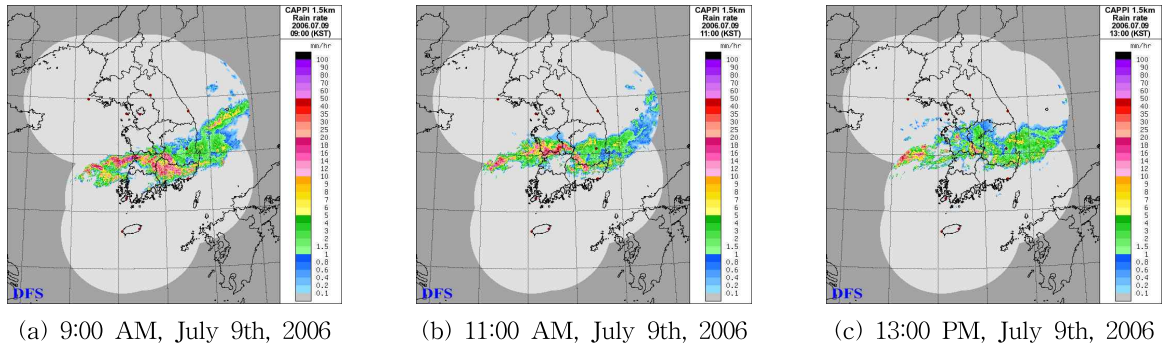


Fig. 11. CAPPI from Typhoon Ewiniar

Table 3. Computing Average Area Rainfall By Raster-based Schemes (Unit: mm)

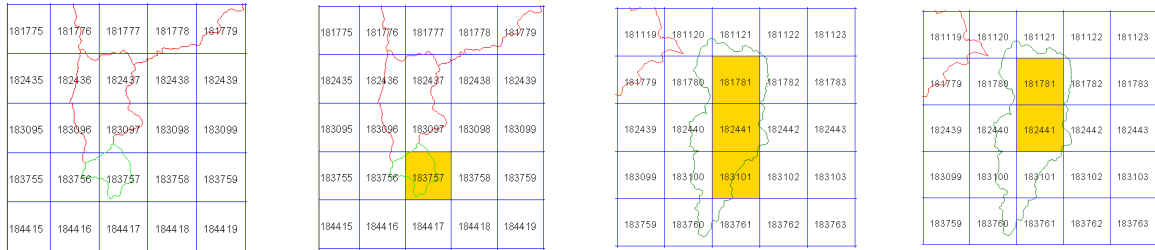
River	Area (km ²)	9 AM		10 AM		11 AM		12 PM		13 PM		Total Rainfall		
		①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①	②	①-②
Gum-Cheon	8.71	7.00	7.00	40.00	40.00	32.50	32.50	29.00	29.00	1.00	1.00	109.50	109.50	0.00
Gwarye-Cheon	7.48	0.00	0.00	0.00	0.00	35.00	35.00	4.50	4.50	7.00	7.00	46.50	46.50	0.00
Kumseung-Cheon	11.82	18.50	12.00	14.00	16.00	15.00	16.00	8.50	8.00	5.50	5.00	61.50	57.00	4.50
Daejeon-Cheon	87.82	2.78	2.64	0.13	0.14	23.52	23.00	5.30	5.18	12.87	12.91	44.61	43.86	0.75
Doogye-Cheon	69.70	0.57	0.50	4.43	4.25	18.43	17.44	12.43	13.00	1.29	1.25	37.14	36.44	0.71
Maenoe-Cheon	17.62	3.67	3.00	10.67	10.00	20.67	31.00	15.33	23.00	4.00	4.00	54.33	71.00	-16.67
Banseak-Cheon	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00	13.80	11.00	10.00	10.25	7.20	7.00	31.00	28.25	2.75
Ahgok-Cheon	2.39	0.00	4.00	0.00	40.00	0.00	30.00	0.00	60.00	0.00	1.00	0.00	135.00	-135
Jinjam-Cheon	26.38	0.00	0.00	0.00	0.00	27.60	27.17	10.00	10.67	1.80	2.00	39.40	39.83	-0.43
Tandong-Cheon	20.77	0.00	0.00	0.00	0.00	7.25	7.25	11.00	11.00	2.25	2.25	20.50	20.50	0.00
Youdeung-Cheon	289.14	5.14	5.14	4.24	4.35	21.70	21.39	12.77	12.59	7.91	7.86	51.77	51.34	0.43
Gab-Cheon	648.87	3.04	3.00	5.66	5.62	19.04	18.89	16.41	16.42	5.26	5.21	49.41	49.14	0.27
Average	100.53	3.39	3.11	6.59	10.03	19.54	22.55	11.27	16.97	4.67	4.71	45.47	57.36	-11.89

Note) ① : Rainfall by Largest share rule, ② : by Centroid point rule

영상을 바탕으로 레스터 기반 연산 방법인 최대 점유율 기법과 중앙치 기법으로 구분하여 강우량을 산정한 결과는 Table 3과 같다. 레스터 기반 유역평균강우량 산정시 12개 유역 중 9개 유역에서 강우량 산정결과가 상이하게 나타났으며, 특히 유역 면적이 가장 작은 어곡천의 경우 Fig. 12와 같이 최대 점유율 기법에서 전혀 강우가 발생하지 않는 것으로 계산되나, 중앙치 기법에서는 5시간 동안 135mm의 큰 강우가 발생하는 것으로 계산되었다. 이러한 오차는 유역 면적이 작은 경우에는 그 영향이 상대적으로 크게 작용하며, 유역 면적이 큰 경우는 영향이 작아지는 경향을 보이게 되는데 유역면적이 가장 작은 어곡천에서 이를 확인할 수 있었다.

4.2.2 CIVCOM 벡터 모형 기반 강우량 산정

CIVCOM 벡터 기반 강우량 산정 기법은 유역내 각각의 픽셀별 CAPPI 영상의 화소가 차지하는 면적과 유역의 벡터 경계선을 적용하여 유역평균강우량을 산정하는 벡터 기반 연산 방법이다. 본 연구의 대상 유역인 갑천유역 내 12개 하천에 대한 CIVCOM 모형 기반 유역평균강우량 산정결과는 Table 4와 같으며, Fig. 13은 어곡천과 매노천에 대한 CIVCOM 처리 결과를 나타낸다. Fig. 13에 나타난 바와 같이, CIVCOM 모형은 유역 경계에 위치한 픽셀에 대해 유역에 포함된 면적만을 계산에 포함시킴으로써 기존의 레스터 방법보다 정확한 강우량을 산출하는

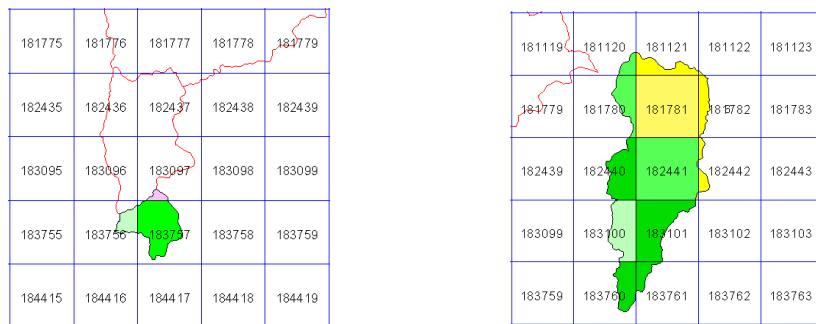


(a) Largest share rule (b) Centroid point rule (a) Largest share rule (b) Centroid point rule
 (1) Ahgok-Cheon River (2) Maenoe-Cheon River

Fig. 12. Areal Boundary Relationships by Raster-based Schemes

Table 4. Average Areal Rainfall Computed by CIVCOM

River	Area(km ²)	Time					Total Rainfall (mm)
		9 AM	10 AM	11 AM	12 PM	13 PM	
Gumchun-Cheon	8.71	6.23	23.68	24.52	25.64	1.21	81.29
Gwarye-Cheon	7.48	0.00	0.00	26.31	4.72	6.69	37.72
Kumseung-Cheon	11.82	13.30	13.99	15.87	9.59	5.56	58.32
Daejeon-Cheon	87.82	2.68	0.20	23.71	5.30	12.90	44.79
Dooye-Cheon	69.70	0.61	4.69	16.53	13.13	1.34	36.29
Maenoe-Cheon	17.62	3.37	11.87	16.61	27.53	3.95	63.32
Banseak-Cheon	15.60	0.00	0.00	13.47	9.85	6.72	30.03
Ahgok-Cheon	2.39	3.75	40.00	27.64	54.32	1.00	126.71
Jinjam-Cheon	26.38	0.00	0.00	26.32	9.68	2.12	38.12
Tandong-Cheon	20.77	0.00	0.00	9.26	9.99	2.87	22.12
Youdeung-Cheon	289.14	5.14	4.61	21.10	12.80	7.87	51.53
Gab-Cheon	648.87	3.02	5.81	18.74	16.23	5.19	49.00



(a) Ahgok-Cheon River (b) Maenoe-Cheon River

Fig. 13. Areal Boundary Relationships by CIVCOM

Table 5. Computing of Average Areal Rainfall by CIVCOM and Raster-based Schemes (Unit: mm)

River Name	Area (km ²)	Raster-based Schemes		CIVCOM (3)	(1) - (3)		(2) - (3)	
		Largest share rule (1)	Centroid point rule (2)		(mm)	(%)	(mm)	(%)
Gumchun-Cheon	8.71	109.50	109.50	81.29	28.21	35	28.21	35
Gwarye-Cheon	7.48	46.50	46.50	37.72	8.78	23	8.78	23
Kumseung-Cheon	11.82	61.50	57.00	58.32	3.18	5	-1.32	2
Daejeon-Cheon	87.82	44.61	43.86	44.79	-0.18	0	-0.93	2
Dooye-Cheon	69.70	37.14	36.44	36.29	0.85	2	0.15	0
Maenoe-Cheon	17.62	54.33	71.00	63.32	-8.99	14	7.68	12
Banseak-Cheon	15.60	31.00	28.25	30.03	0.97	3	-1.78	6
Ahgok-Cheon	2.39	0.00	135.00	126.71	-126.71	100	8.29	7
Jinjam-Cheon	26.38	39.40	39.83	38.12	1.28	3	1.71	4
Tandong-Cheon	20.77	20.50	20.50	22.12	-1.62	7	-1.62	7
Youdeung-Cheon	289.14	51.77	51.34	51.53	0.24	0	-0.19	0
Gab-Cheon	648.87	49.41	49.14	49.00	0.41	1	0.14	0
Average	100.53	45.47	57.36	53.27	-7.80	16.08	4.09	8.17

것으로 분석되었다.

4.2.3 CIVCOM 모형과 기존 레스터 기법에 의한 강우량 비교

본 연구에서 개발한 벡터 기반 CIVCOM 모형과 현재 일반적으로 활용되고 있는 레스터 기반 영상처리 기법에 의해 산정된 유역평균강우량을 비교하면 Table 5와 같다. 태풍 예위니아에 의한 호우시 12개 대상하천 모두에서 차이가 발생하였으며, 최대 점유율 기법을 이용한 레스터 기반 강우량 산정에서 무강우로 나타난 어곡천을 제외하고, CIVCOM 모형과 레스터 기반 강우량산정 기법간의 차이는 최대 35%까지 발생하였다. 특히, 유역면적이 작은 하천에 대해 레스터 기반 기법의 오차가 크게 발생하였으며, 이는 유역 면적이 작은 중소규모 하천의 홍수 예측 시 강우 자료 입력에 중대한 오류가 발생할 수 있음을 의미한다. 최근 국지적 돌발홍수와 관련한 레이더 강우와 홍수예측 시스템의 연계 운용에 대한 관심이 높아져가고 있는데 대상 유역이 도시에 위치한 소유역들이 많아서 CIVCOM 모형의 활용성은 더욱 높을 것으로 판단된다.

또한, CAPPI 영상으로부터 추출할 수 있는 시간별 면적강우량을 본 연구에서 개발한 CIVCOM 모형의 결과를 참값이라 가정할 때, 기존 레스터방식을 이용해 산출한 우량추상도의 적용성을 통계적 측면에서 검토하였으며, 이를 위한 통계적 평가 기준은 Eq. (3)~(5)와 같고, Table 6은 통계적 평가기준에 따른 결과이다.

• INDAGR : Index of agreement(일치도)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_o(t) - q_s(t))_i^2}{\sum_{i=1}^n (|q_s(t)'| + |q_o(t)'|)_i^2} \quad (3a)$$

$$q_s(t)' = q_s(t) - \bar{q}_o, \quad q_o(t)' = q_o(t) - \bar{q}_o \quad (3b)$$

여기서, $q_o(t)$ 는 벡터모형의 값, $q_s(t)$ 는 레스터모형의 값이며, INDAGR은 1에 가까울수록 만족스러운 결과이다.

• WPPMOM : Weighted Pearson product moment(가중 피어슨 곱모멘트)

$$S_s < S_o: \rho PM = C \times r, \quad C = S_s / S_o \quad (4a)$$

$$S_s \geq S_o: \rho PM = C \times r, \quad C = S_o / S_s \quad (4b)$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_o(i) - \bar{q}_o}{S_o} \right) \left(\frac{q_s(i) - \bar{q}_s}{S_s} \right) : \quad (4c)$$

Pearson product moment

여기서, S_o 는 벡터모형의 값의 표준편차, S_s 는 레스터모형의 값의 표준편차이며, WPPMOM은 1에 가까울수록 만족스러운 결과이다.

• MOBJFN : Multi-objective function(다중목적함수)

Table 6. Statistical Evaluation of Raster-based Schemes

River	Area (km ²)	Raster-based Schemes	INDAGR	WPPMOM	MOBJFN
Gumchun-Cheon	8.71	Largest share rule	0.898	0.655	1.736
		Centroid point rule	0.898	0.655	1.736
Gwarye-Cheon	7.48	Largest share rule	0.971	0.741	0.519
		Centroid point rule	0.971	0.741	0.519
Kumseung-Cheon	11.82	Largest share rule	0.912	0.685	0.489
		Centroid point rule	0.973	0.810	0.047
Daejeon-Cheon	87.82	Largest share rule	1.000	0.992	0.005
		Centroid point rule	1.000	0.975	0.010
Dooye-Cheon	69.70	Largest share rule	0.995	0.922	0.061
		Centroid point rule	0.999	0.951	0.128
Maenoe-Cheon	17.62	Largest share rule	0.848	0.581	0.337
		Centroid point rule	0.872	0.648	0.716
Banseak-Cheon	15.60	Largest share rule	0.999	0.976	0.005
		Centroid point rule	0.988	0.884	0.203
Ahgok-Cheon	2.39	Largest share rule	N/A	N/A	N/A
		Centroid point rule	0.996	0.924	0.045
Jinjam-Cheon	26.38	Largest share rule	0.999	0.950	0.015
		Centroid point rule	0.999	0.963	0.011
Tandong-Cheon	20.77	Largest share rule	0.986	0.967	0.181
		Centroid point rule	0.986	0.967	0.181
Youdeung-Cheon	289.14	Largest share rule	0.999	0.957	0.005
		Centroid point rule	1.000	0.978	0.002
Gab-Cheon	648.87	Largest share rule	1.000	0.981	0.002
		Centroid point rule	1.000	0.984	0.002

$$MF = \sum_{i=1}^n [(\ln q_{po} - \ln q_{ps})_i^2 + 1.5(\ln V_o - \ln V_s)_i^2] \quad (5)$$

여기서, q_{po} 는 침투 벡터모형의 값, q_{ps} 는 침투 레스터모형의 값, V_o 는 벡터모형의 값의 누가강우량, V_s 는 레스터모형의 값의 누가강우량이며, MOBJFN은 0에 가까울수록 만족스러운 결과이다.

Table 6에 제시된 바와 같이 레스터 방식에 따른 우량 추상도의 통계적 평가 결과, 유역면적이 상대적으로 큰 대전천, 두계천, 유등천, 갑천보다 유역면적이 상대적으로 작은 검천천, 과례천, 어곡천 등에서 통계적 평가 결과가 낮게 나타났다. 이러한 분석 결과가 제시하는 의미는 유역면적이 작은 중소하천에 대해 CAPPI 영상을 활용할 경우 기존 레스터 방식의 강우량 산정 방법은 오차가 커질 수 있다는 것으로서 중소하천에 대한 레이더 강우량 산정 시 주의가 요구되는 부분이다.

4.2.4 CIVCOM 모형 기반 면적강우량을 이용한 홍수유출해석

본 연구에서 개발한 CIVCOM 모형에 따른 면적강우량

은 기존 레스터방식의 면적강우량보다 개선된 결과를 제시하는 바, 이를 토대로 한 홍수유출해석의 적용성을 검토하였다. 검토를 위한 대상유역은 갑천유역으로 설정하였으며, 2006년 태풍 에위니아시 기록된 강우사상에 대해 CIVCOM 모형 및 지상관측망으로 부터 얻어진 각각의 면적강우량을 대상으로 HEC-HMS모형을 이용하여 소 유역에 대해서는 Clark 단위도법, 하도구간에 대해서는 Muskingum 하도추적법을 적용하여 홍수량을 산정하였다. 유출 해석상 필요한 입력 자료인 각 유역 면적, 각 유역로부터 유출 출구까지의 경사, 길이 등 유역의 지형인자, 유출곡선지수 및 각 유역별 수문인자는 금강유역종합 치수계획(국토해양부, 2008)에서 산정된 값을 인용하였으며, CIVCOM 모형 및 지상관측망으로 얻어진 각각의 면적강우량에 대한 유출해석결과를 갑천유역내 수위관측소인 회덕, 유성, 가수원에서의 실측 홍수량과 비교하였다. Table 7은 CIVCOM 모형 기반의 홍수유출해석 결과를 정리한 것이며, Fig. 14는 이를 도시한 것이다.

CIVCOM 모형에 의한 홍수유출해석 결과와 실측 홍수량을 비교 검토한 결과, CIVCOM 모형 기반의 레이더 강우를 이용한 유출해석의 경우 침투시간은 가수원과 유성

Table 7. Results of Rainfall-runoff Simulations for '06 Typhoon Ewinar

(unit : m³/s)

Flood Water Stage		observation	Ground rainfall		CIVCOM-based radar rainfall	
			simulation	error (ΔQ_p , %)	simulation	error (ΔQ_p , %)
Gasuwon	Peak flow	175.82	152.25	23.57, 13.4	195.17	19.35, 11.0
	Peak time	7/9 17 hr	7/9 17 hr	-	7/9 18 hr	1 hr
Yuseong	Peak flow	154.73	105.32	49.41, 31.9	159.63	4.9, 3.2
	Peak time	7/9 19 hr	7/9 19 hr	-	7/9 20 hr	1 hr
Hoeduck	Peak flow	248.01	241.44	6.57, 2.6	242.03	5.98, 2.4
	Peak time	7/9 19 hr	7/9 19 hr	-	7/9 19 hr	-

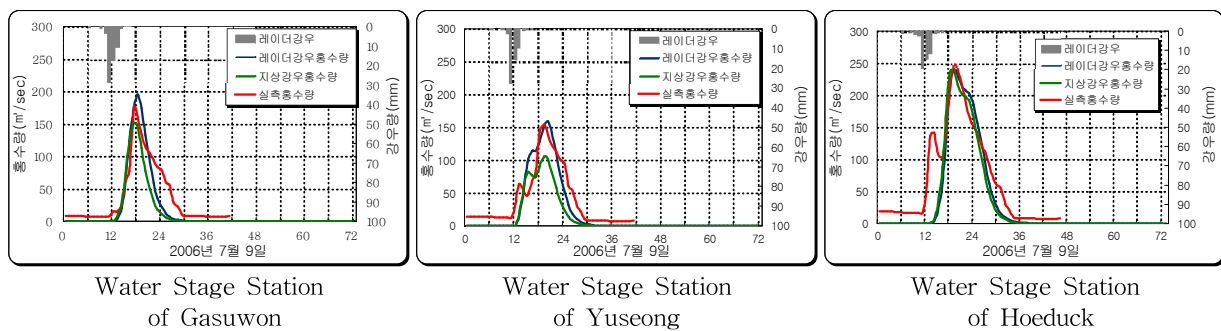


Fig. 14. Results of Rainfall-runoff Simulations for '06 Tphoon Ewinar

수위표지점에서 실측홍수수문곡선 및 지상강우를 이용한 유출해석 대비 1시간 늦게 발생하였으나 유출수문곡선의 형상에 있어 비교적 잘 일치하였고, 첨두 유량은 레이더 강우를 이용한 계산치가 실측대비 최대 11% 정도 크게 산정된 반면, 지상강우를 이용한 경우는 최대 31%까지 작게 산정되었다. CIVCOM 모형 기반의 레이더 강우를 이용한 유출해석에 대한 전체적인 모의 결과는 실측홍수수문곡선과 비교적 잘 일치하였다.

5. 결론

홍수피해예방을 위한 단기 강우예측은 예보 시간의 제한과 정보의 필요성 등으로 인하여 연구와 실무 분야에서 지대한 관심의 대상이 되고 있으나 강우예측을 위한 실시간 입력 자료의 제한으로 실무 적용에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 현업에서 쉽게 취득 할 수 있는 강우레이더 자료인 CAPPI 영상의 벡터 기반 처리기술 CIVCOM을 개발하여 실시간 강우자료의 효율적인 처리기법을 제시하였고 이를 갑천유역에 적용·검토함으로써 CIVCOM 모형의 적용성을 검증하였다. 본 연구의 성과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레이더 강우자료는 픽셀 단위의 강우정보를 갖는 CAPPI 영상으로 제공되고 있으며, 이러한 영상자

료의 연산방법은 레스터 기반 방법과 벡터 기반 방법으로 구분된다. 현재까지 레이더 강우자료로부터 유역평균강우량을 산정하는 방법은 레스터 기반 연산에 의해 처리되었으나, 일정한 규격의 픽셀 정보를 활용하는 레스터 기반 연산의 특성으로 인하여 중·소유역에서 상대적으로 큰 오차를 발생시키는 것으로 분석되었다.

- 2) 이러한 연산 오차를 개선하기 위해 본 연구에서는 벡터 기반의 유역평균강우량 산정 기법인 CIVCOM 모형을 개발하였고 2006년 태풍 에위니아에 대한 강우레이더 자료를 갑천유역에 대해 적용하여 기존 레스터 기반 유역평균강우량과 정량적으로 비교 분석하였으며 유역면적이 픽셀 단위 수준의 매우 작은 소유역에서 상대적으로 양호한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.
- 3) 레스터 방식에 따른 우량주상도의 통계적 평가 결과 유역면적이 작은 중소하천에 대해 CAPPI 영상을 활용할 경우 기존 레스터 방식의 강우량 산정 방법은 오차가 커질 수 있어서 레이더 강우량 산정시 주의가 필요한 것으로 분석되었다.
- 4) CIVCOM 모형을 이용한 면적강우량의 홍수유출해석에 대한 적용성을 검토하기 위해 갑천유역의 주요

수위표지점을 대상으로 홍수유출해석을 수행한 결과 실측홍수수문곡선과 비교적 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

레이더 강우자료는 지상관측망 대비 강우의 강도, 강우량 뿐만 아니라 공간적 분포까지 쉽게 파악이 가능하여, 중소규모 하천의 홍수예경보 분야와 미계측 유역에 대한 적용성이 높은 것으로 알려지고 있다. 그러나 본 연구에서 검토한 결과 기존 레스터 기반의 연산기법은 중소규모 유역에 대해 상대적으로 큰 오차를 발생시키는 것으로 나타났다. 반면에 본 연구에서 개발한 벡터 연산 기반의 CIVCOM 모형은 픽셀 수준의 소유역에 대해서도 강우 벡터 격자와 유역경계선 벡터를 이용한 벡터 연산 처리에 의해 정확도가 높은 강우량 산정이 가능하여 중소규모 유역에 대한 홍수 예경보의 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

건설교통부 (2004). 전국 강우레이더 설치 및 홍수예경보 시스템 개선 기본계획 수립 (3차년도).

국토해양부 (2008). 금강유역종합치수계획.

기상연구소 (1996). 레이더를 이용한 유역강우 산정 기법 연구(II), 연구보고서.

김광섭, 최규현, 김종필 (2008). “기상 레이더를 이용한 실시간 강수산정 기법 적용성 분석.” **한국수자원학회 2008년도 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 997-1000.

김병식, 홍준범, 김형수, 최규현 (2007). “조건부 합성 방법을 이용한 레이더 강우와 지상강우자료의 조합.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 255-265.

김영일, 최지안, 김태순, 허준행 (2009). “ANN을 이용한 Radar 면적강우량의 정확도 향상.” **한국수자원학회 2009년도 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 37-41.

박규남 (2009). “레이더 위성 영상을 이용한 미계측 유역의 강우량 산정에 관한 연구.” 석사학위논문, 수원대학교 대학원.

배영혜 (2008). “칼만필터 기법에 의한 레이더강우 보정 및 분포형 모형을 이용한 홍수유출 모의.” 석사학위논문, 인하대학교 대학원.

석미경, 남경엽, 김영화, 오성남 (2005). “WPMM을 이용한 레이더 반사도로부터 정량적 레이더 강우강도의 추정.” **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제41권, 제1호, pp. 123-138.

엄원근 (1995). 레이더 기상학. 영재사, 서울.

오경두, 이순철, 안원식, 최병규, 강태호 (2008). “레이더영상 디지털변환(RAIDOM)의 강우-유출모의 적용성 연

구.” **한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 686-688.

유철상, 김병수, 김경준, 최정호 (2007). “우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-Truth 방법 검토” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 743-754.

이원근 (2010). “SWAT 모형을 이용한 레이더반사도(CAPPI)의 적정 격자크기 추정.” 석사학위논문, 연세대학교 대학원.

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

지계환, 오경두, 안원식 (2011). “인공신경망과 CAPPI 자료를 이용한 단기강우 예측.” **한국수자원학회 2011년도 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 72-76.

Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.J., and Johnson, E.R. (1998). “Mean-field rainfall bias studies for WSR-88D.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 149-159.

Ha, E., and North, G.R. (1994). “Use of multiple gauges and microwave attenuation of precipitation for satellite verification.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, pp. 629-6367.

Ha, E., and North, G.R. (1999). “Error Analysis for Some Ground Validation Designs for Satellite Observations of precipitation.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, pp. 1949-1957.

Ha, E., North, G.R., Yoo, C., and Ha, K. (2002). “Evaluation of some ground truth designs for satellite estimates of rain rate.” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, pp. 65-73.

Kitchen, M., and Blackall, R.M. (1992). “Representativeness errors in comparisons between radar and gauge measurements of rainfall.” *Journal of Hydrology*, Vol. 134, pp. 13-33.

Jessen, M., Einfalt, T., Stoffer, A., and Mehlig, B. (2005). “Analysis of heavy rainfall events in North Rhine-Westphalia with radar and raingauge data.” *Atmospheric Research*, Vol. 77, pp. 337-346.

Seo, D.J. (1998). “Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 37-52.

논문번호: 12-021	접수: 2012.02.27
수정일자: 2012.04.20/05.10	심사완료: 2012.05.10