

위성정보에 의한 강우예측과 홍수유출 및 범람 연계 해석 (I): 이론 및 모형의 개발

Rainfall Forecasting Using Satellite Information and Integrated Flood Runoff and Inundation Analysis (I): Theory and Development of Model

최혁준* · 한건연** · 김광섭***

Choi, Hyuk Joon · Han, Kun Yeun · Kim, Gwangseob

Abstract

The purpose of this study is to improve the short term rainfall forecast skill using neural network model that can deal with the non-linear behavior between satellite data and ground observation, and minimize the flood damage. To overcome the geographical limitation of Korean peninsula and get the long forecast lead time of 3 to 6 hour, the developed rainfall forecast model took satellite imageries and wide range AWS data. The architecture of neural network model is a multi-layer neural network which consists of one input layer, one hidden layer, and one output layer. Neural network is trained using a momentum back propagation algorithm. Flood was estimated using rainfall forecasts. We developed a dynamic flood inundation model which is associated with 1-dimensional flood routing model. Therefore the model can forecast flood aspect in a protected lowland by levee failure of river. In the case of multiple levee breaks at main stream and tributaries, the developed flood inundation model can estimate flood level in a river and inundation level and area in a protected lowland simultaneously.

Keywords : *neural network, back propagation algorithm, rainfall forecast, satellite, flood inundation*

요 지

본 연구의 목적은 인공위성 자료와 지상의 관측자료간의 비선형 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 신경망 모형을 이용하여 단시간 강우량 정보를 사전에 예측하여, 하천제방의 붕괴로 인한 상습 침수지역에서의 홍수범람 양상을 실시간으로 예측함으로써 홍수재해로부터의 피해를 최소화시키는데 있다. 강우예측 신경망 모형은 현재의 대기상태를 나타내는 인공위성 자료와 실시간으로 전송되는 자동기상관측소 자료를 입력자료로 하여 현재부터 3시간 및 6시간 선행시간까지의 면적평균강우량을 예측할 수 있도록 구성하였다. 신경망 모형의 구조는 입력층과 출력층 사이에 하나의 은닉층이 존재하는 다층 신경망으로 구성하였으며, 학습단계에서는 오류 역전파 알고리즘 학습방법 중 모멘텀법을 사용하였다. 예측된 면적평균강우량으로부터 홍수량을 산정하고, 이를 이용하여 하천의 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람양상을 예측할 수 있도록 1차원 흐름모형과 연계한 동역학적 홍수범람 모형을 개발하였다. 개발된 홍수범람 모형은 본류와 지류의 여러 지점에서 제방이 붕괴될 경우, 하도의 홍수위 및 제내지에서의 침수위와 침수면적이 일괄적으로 모의될 수 있도록 구성하였다.

핵심용어 : 신경망, 오류역전파 알고리즘, 강우예측, 인공위성, 홍수범람

1. 서 론

최근에 들어 지구환경의 변화에 따른 이상기후의 영향으로 태풍 및 집중호우로 인한 하천범람 등 홍수재해에 의한 인명과 재산의 피해가 급증하고 있다. 특히 한반도 지역에서는 집중호우와 태풍과 같은 이상강우로 인한 홍수피해의 발생이 매년 나타나고 있으며 홍수피해의 빈도와 강도는 증가하고 있는 실정이다. 이러한 이상강우에 의한 홍수피해는 우리나라에 국한된 현상이 아니며 지구촌 곳곳에서 발생하고

있다.

2002년 8월 중부 유럽에서는 150년만의 최대 규모의 홍수가 발생하였는데, 독일의 작센주에서 시간당 160 mm가 넘는 집중호우가 내리는 등의 이상강우로 인해 4백만명의 이재민이 발생하고 18조원의 복구비용이 소요되었다. 우리나라 역시 2002년에 발생한 집중호우와 태풍 “루사”로 인해 270명이 사망·실종되었으며 총 6조 1천억원의 피해가 발생하였고, 복구비만도 9조 1천억원이 소요되었다. 2003년 태풍 “매미”에 의한 홍수피해는 사망·실종 131명, 피해액 4조 2

*한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원(E-mail : hjchoi@kict.re.kr)

**정희원 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

***정희원 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

천억원, 복구액 6조 4천억원에 달하였다.

과학기술의 발달에도 불구하고 기상변화는 예측하기 힘든 방향으로 전개되고 있어 예기치 못한 기상이변으로 발생할 수 있는 기상재해에 대비할 필요성이 증가하고 있는 실정이다. 이러한 집중호우는 현재의 종관 관측체계에 의존하고 있는 예보시스템으로는 예측에 어려움이 많을 뿐만 아니라 이에 따른 대응에도 한계가 있다. 이런 점을 극복하기 위해서 위성정보와 지상의 관측자료를 입력으로 하는 신경망 모형을 이용하여 단시간 강수량 정보를 미리 예측함으로써 보다 합리적이고 신뢰성 있는 홍수예보 시스템을 구축하여 이상 강우에 의한 홍수재해로부터 수많은 인명과 재산을 보호할 수 있다.

홍수와 관련된 지금까지의 연구는 강우와 홍수유출 및 홍수범람 해석이 서로 분리되어 연계성이 부족하였으나, 본 연구에서는 홍수재해의 근본적인 원인이 되는 강우를 사전에 예측하기 위해서 위성정보를 활용한 강우예측 기법을 개발하고자 하였다. 또한 기상-강우-유출-범람의 전 과정을 연계하여 해석하기 위해서 강우예측과 이에 대한 홍수유출 및 홍수범람 해석이 가능한 통합시스템을 구성하여 실시간으로 구동되는 효율적인 홍수예보 시스템을 구축하고자 하였다.

1960년대 말 기상위성이 발사된 이후 인공위성 자료를 이용한 강우량 추정에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Barrett and Martin, 1981; Kidder and Vonder Haar, 1995; Levizzani *et al.*, 1996). Arkin(1979)은 운정온도와 강우량과의 상관관계를 조사하여 235K에서 상관관계가 가장 높음을 발견하고, 235K보다 낮은 지역에는 3 mm/hr의 강우가 발생하고, 그보다 온도가 높은 지역은 강우가 없다고 가정하여 강우량을 추정하였다. Griffith *et al.*(1978)은 30분 간격의 적외선 영상을 이용함으로써 각각의 구름을 추적하여 구름의 발달단계에 따라 강우량을 구하였으며, Negri *et al.*(1984)은 Griffith의 방법에서 강우량을 결정하는 인자가 구름의 면적임을 발견하였다. Adler and Negri(1988)는 대류운과 층운 형태의 구름을 구별하여 강우를 추정하였는데, 1차원 구름 모델을 이용하여 강우량과 강우발생지역의 면적을 구하였다.

신경망에 대한 이론적인 개념은 1950년대부터 이루어졌으며, 1980년대 말 컴퓨터의 급속한 발달과 함께 실질적인 학습방법이 개발되면서 활발한 연구와 적용이 시작되었다. 수자원 분야에서는 1990년 이후부터 신경망 이론을 이용한 많은 연구가 발표되었다. French *et al.*(1992)은 신경망 이론을 강우예측에 적용하여 시간과 공간에 따른 강우량의 예측을 시도하였고, Seo and Smith(1992)는 기상자료와 레이더 자료를 이용하여 연직평균적분한 함수량의 질량보존을 고려하는 모형을 구성하였다. French *et al.*(1994a; 1994b)은 레이더 자료, 위성자료 및 기상자료를 이용하여 강우량을 실시간 예측할 수 있는 2차원 모형을 구성하였다. 모형의 상태는 Kalman filter 알고리즘을 이용하여 예측을 위한 최적의 상태로 계속 갱신될 수 있도록 하였다.

하천제방의 붕괴로 인한 범람 홍수와 해석은 주로 댐 붕괴의 문제와 연관되어 있는데 Saint-Venant(1871a; 1871b) 이후 많은 연구자들에 의해서 꾸준히 연구되어 왔다. 국내에서의 댐 및 제방붕괴로 인한 홍수범람에 대한 연구로는 김중해 등(2003)이 홍수위 계산에 있어서 도입되는 불확실성의

원인을 분석하고 정량화하여 확률론적 홍수위 계산을 실시함으로써 제방일류에 대한 제내지의 범람특성을 해석할 수 있는 모형을 개발하였다. 또한 한건연 등(1997a; 1997b)은 댐 및 하천제방에 대한 수문학적 위험도를 평가하기 위해서 Monte Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 위험도 모형을 개발하였고, Han *et al.*(1998; 2003; 2004)은 제방 붕괴로 인한 제내지에서의 범람홍수류의 특성을 규명하고자 하였다.

그러나 하천의 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람양상을 체계적이고 효율적으로 예측하고 분석하기 위한 강우, 유출, 범람의 전 과정을 연계하여 해석하는 종합적인 홍수방제 시스템에 대한 연구는 전 세계적으로 전무한 실정이다. 또한 인공위성 자료를 이용하여 강우량을 추정한 연구는 있으나, 위성정보에 의한 강우예측과 연계한 홍수유출 및 홍수범람 해석 등의 홍수방제에 직접적으로 적용한 사례는 없다. 따라서 본 연구는 위성정보를 이용한 강우량 예측에서부터 유역에서의 홍수량 계산 및 이로 인한 홍수범람의 해석을 통합적으로 수행할 수 있는 시스템을 구축함으로써 국내 수자원 및 방제 분야에서 기여하고자 한다.

2. 인공위성 정보의 분석 및 활용

세계기상기구(WMO)는 기상위성과 고성능 컴퓨터, 고속통신망 기술을 복합적으로 활용하여 전세계 기상관측 및 자료의 분석, 기상정보 제공을 강화하기 위한 세계기상감시(WWW: World Weather Watch) 계획을 추진하고 있다. 전 지구에 대하여 일제히 기상관측을 실시하고 전지구 규모의 데이터를 취득하기 위해서 Fig. 1에 제시된 바와 같이 적도 상공에 정지기상위성과 극지방을 관측하기 위해 지구를 세로방향으로 회전하는 극궤도위성으로 세계 기상위성망을 구성하고 있다.

정지기상위성은 적도 상공 약 36,000 km에서 24시간에 지구를 한 바퀴 돌게 되며 그 동안에 지구도 1번 회전하기 때문에, 정지위성에서는 언제나 지구의 같은 면을 촬영할 수 있다. 일본 기상청은 1975년 GMS-1호를 시작으로 1995년 GMS-5호까지 정지기상위성을 개발하고 발사하여 아시아 태평양의 위성 관측업무를 담당하였다. 그러나 1999년 GMS-5호의 후속위성인 MTSAT-1의 발사실패에 따라 세계기상기구에서는 아시아 태평양 지역의 위성관측업무를 위해 미국의 GOES-9호 위성을 동경 155도로 옮겨와서 GMS-5호의

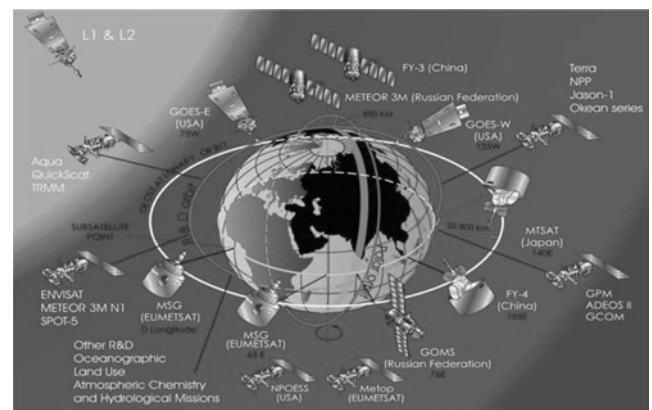


Fig. 1 Meteorological satellite network

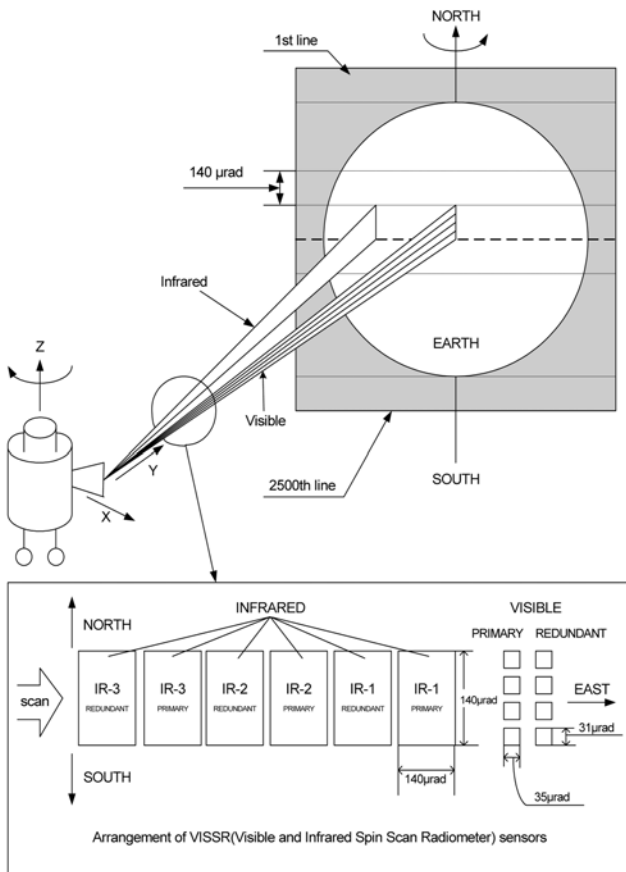


Fig. 2 Concept of observation by GMS-5

임무를 계승하도록 하였다. GOES-9호 위성은 2003년 4월 14일부터 궤도상의 시험운행을 거쳐 4월 16일부터 영상관측을 시작하여, 5월 22일까지 정상운행을 위한 시험을 거쳐 5월 22일 0600UTC부터 정규관측을 시작하였다.

2.1 GMS-5 정지기상위성

GMS-5는 위성자체의 자세를 안정시키기 위해 1분에 약 100회의 속도로 회전하고 있는 위성이다. 이 회전을 이용하여 가시적외복사계(VISSR: Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 센서로 지구를 촬영하고 있다. VISSR이라는 이름대로 복사계에 장착된 가시 및 적외선센서에 의해 가시영상과 적외영상이 동시에 촬영된다. 지구로부터 GMS-5에 입사된 빛은 반사경과 프리즘에 의해 센서에 도달한다. 센서는 위성의 자전 방향에 평행하며, Fig. 2와 같이 배치되어 있다. 가시센서는 적외선센서의 1/4의 크기로 4개가 모여져 배치되어 있다.

2.2 위성정보를 이용한 강우분석

인공위성 자료는 광범위한 영역에 대한 가시광선 및 적외선 자료를 높은 시·공간적 분해능으로 제공하기 때문에 중규모에서부터 소규모 대류운동까지도 탐지할 수 있다. 그러나 인공위성으로부터 얻은 강우에 대한 정보는 위성에서 측정된 복사량을 강우량으로 변환해야 하는 과정을 거쳐야 되므로 결코 쉬운 문제가 아니다. 즉, 인공위성 영상에서는 구름의 분포가 주어지기 때문에 이를 이용하여 강우를 산정하는 것은 간단해 보이지만, 실제 구름 중 강우가 있는 구름은 일부에 지나지 않기 때문에 강우가 있는 구름을 식별

해 내어야 한다.

인공위성 자료를 이용한 강우량 산정에는 일반적으로 적외선과 마이크로파가 사용된다. 적외선 방법은 적외선이 구름층을 통과할 수 없기 때문에 운정온도, 구름의 면적, 형태 등의 여러 특성을 이용하는 간접적인 강우산정 방법이며, 마이크로파 방법은 마이크로파가 강우층을 통과할 때 강우 입자에 의해 산란되거나, 강우층에서 방출되는 성질을 이용하는 직접적인 강우산정 방법이다. 그러나 마이크로파 방법은 마이크로파의 성질상 현재 극궤도 위성에서만 이용할 수 있으므로 하루에 2회 정도의 관측치만을 얻을 수 있으며, 정지위성의 적외선 자료보다 공간적 분해능이 떨어진다. 반면에 적외선 방법은 시·공간적인 분해능이 매우 우수하다 (Levizzani *et al.*, 1996).

인공위성이 발사되고 시간적, 공간적 분해능이 좋은 적외선 자료를 얻을 수 있게됨에 따라 적외선 자료를 이용하여 강우량을 산정하는 많은 방법들이 개발되었다. 적외선은 구름을 통과할 수 없기 때문에 인공위성에 도달한 복사량은 구름의 상부에서 방출되는 에너지이다. 적외선 방법은 적외선이 구름에 대해 거의 흑체라는 가정하에 구름이 있을 경우 구름은 지표에서 도달하는 복사량을 모두 흡수한 후 구름의 온도에 해당하는 흑체복사로 재방출한다는 사실에 기초를 두고 있다.

NAWT(Negri-Adler-Wetzel Technique)는 인공위성에서 측정된 운정온도가 253K보다 낮은 경우 구름이 존재한다고 가정하였다. 구름의 면적이 결정되면 하위 10%와 50%의 면적을 구분하는 온도(T_{10} , T_{50})를 계산한 다음, 각 격자의 운정온도가 T_{10} 보다 낮은 경우에는 9 mm/hr의 강우가 발생하는 지역으로, 운정온도가 T_{10} - T_{50} 사이에 존재하는 경우에는 2 mm/hr의 강우가 발생하는 지역으로 간주하였으며, 운정온도가 T_{50} 보다 높은 경우에는 비강우지역으로 간주하여 강우량을 산정하였다(Negri *et al.*, 1984). Fig. 3은 NAWT 알고리즘에 대한 흐름도를 나타내고 있다.

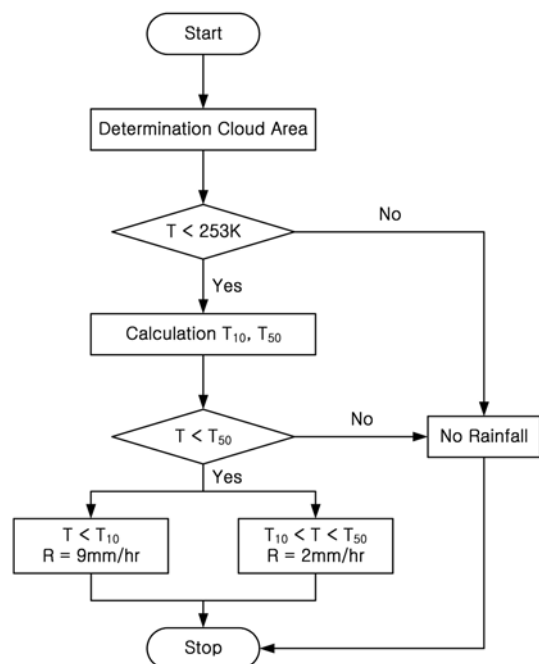


Fig. 3 Flowchart for NAWT algorithm

3. 신경망 모형

본 연구에서는 한반도의 지역적인 한계성을 극복하고 충분한 선행시간이 확보된 강우예측을 위하여 높은 시·공간 분해능을 가진 위성정보를 활용하였다. 이러한 위성정보만으로 유역의 정량강우를 예측하기에는 정확성의 한계가 있기 때문에 지상의 관측자료와 연계되어야 하는 상황이며, 인공위성 자료와 지상의 관측자료간의 비선형성과 불확실성을 가장 잘 반영할 수 있는 신경망 모형을 사용하여 유역의 면적평균강우량을 예측하였다.

3.1 오류 역전파 알고리즘

오류 역전파(Back-Propagation) 알고리즘은 Fig. 4와 같은 다층 신경망의 학습에 효과적으로 사용할 수 있어 다양한 분야에 가장 널리 활용되는 학습 알고리즘이다.

오류 역전파 알고리즘은 출력층의 오차신호를 이용하여 은닉층과 출력층간의 연결강도를 변경하고, 출력층의 오차신호를 은닉층에 역전파하여 입력층과 은닉층과의 연결강도를 변경하는 학습 방법이다.

역전파와 신경망은 학습단계와 예측단계로 구분할 수 있다. 학습단계는 오류 역전파 알고리즘에 의해서 수행되는데, 입력층에서 출력층으로 입력의 전달이 처리되는 순방향 처리과정과 출력층에서 입력층으로 오차신호가 역전파되어 연결강도가 변경되는 역방향 처리과정으로 구성된다. 예측단계는 원하는 결과에 대한 입력만 주어지면 학습단계에서 최종적으로 결정된 연결강도를 이용하여 적절한 출력이 계산되는 과정이다.

3.2 강우예측 신경망 모형

유역에 대한 면적평균강우량의 예측은 강우량의 실측치인 자동기상관측소(AWS) 자료와 현재의 대기상태인 인공위성 자료로부터 추정된 강우량을 입력자료로 하여 구성되는 강우예측 신경망 모형에 의해 실현되었다. 신경망 모형의 출력값은 현재부터 3시간 및 6시간 후의 면적평균강우량을 예측할 수 있도록 구성하였으며, 신경망 모형의 구조는 기존의 연구에서 주로 이용한 것과 같이 입력층과 출력층 사이에 하나의 은닉층이 존재하는 다층 신경망을 이용하였다.

신경망 모형의 입력층과 출력층의 성분으로는 실수형태의

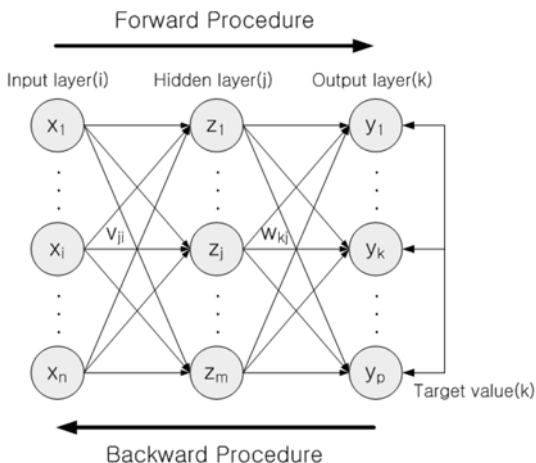


Fig. 4 Schematic diagram for back propagation algorithm

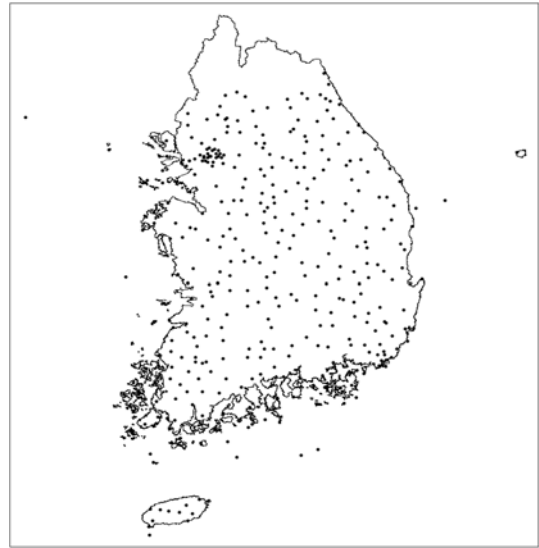


Fig. 5 Spatial distribution of AWS

시계열 자료로 이루어진 강우자료를 사용하였다. 입력층의 각 뉴런에 대한 입력값들을 결정하기 위해서 먼저 자동기상관측소 자료로부터 Thiessen 방법을 이용하여 유역의 면적평균강우량을 산정하였다. 산정된 면적평균강우량 시계열을 3시간 및 6시간 지체시킨 다음, Fig. 5에 제시된 전국 360개 지점의 강우량(AWS 자료) 시계열과 상관관계를 분석하여 상관성이 가장 높은 n개 지점의 강우량 시계열을 선정하였다.

두 변수의 상관관계를 나타내는 상관계수는 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 CC 는 상관계수이고, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, 이다.

또한 Fig. 6과 같이 동아시아 영역을 169(13×13)개의 격자로 구분하고, NAWT 알고리즘을 이용하여 각 격자에 대한 위성분석자료인 운정온도를 강우량으로 추정하였다.

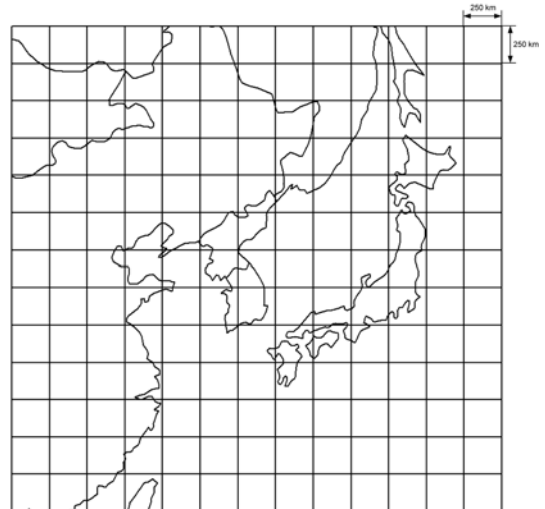


Fig. 6 Spatial resolution of satellite imagery

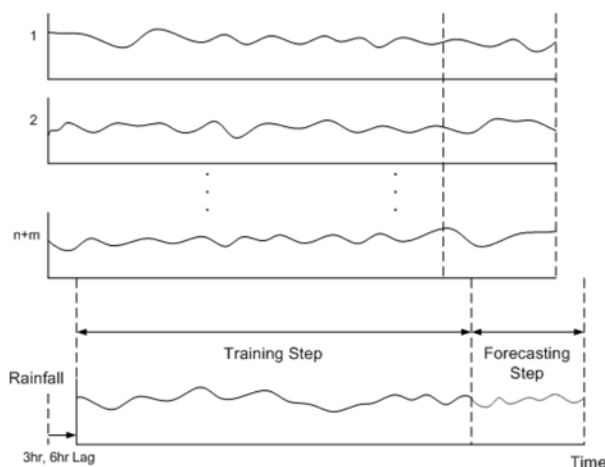
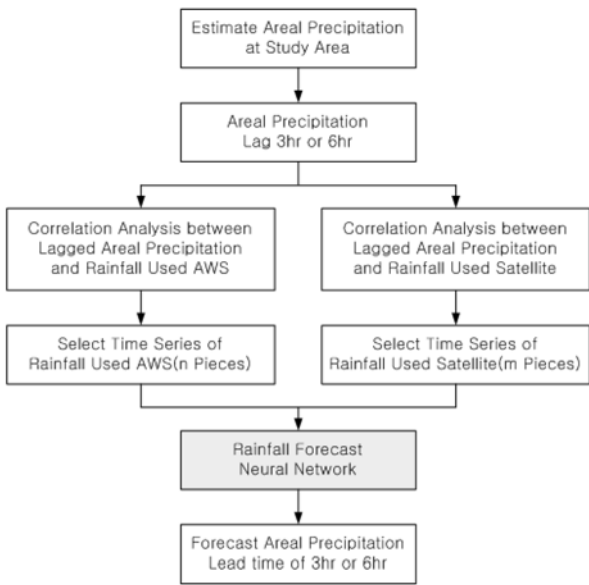


Fig. 7 Concept of rainfall forecast neural network

같은 방법으로 인공위성 자료로부터 추정된 강우량과 3시간 및 6시간 지체시킨 지역의 면적평균강우량과의 상관관계를 분석하여 상관성이 가장 높은 m개 격자의 강우량 시계열을 선정하였다. 이와 같이 선정된 n+m개의 강우량 자료를 신경망 모형의 입력층에 대입하고 학습단계를 거쳐 연결강도를 결정한 다음, 예측기간에 대한 대상지역의 면적평균강우량을 예측하였다. Fig. 7은 강우예측 신경망 모형의 개요를 나타내고 있다.

4. 홍수유출 및 홍수범람 해석

4.1 홍수유출 해석

본 연구에서는 대상지역의 홍수량을 산정하기 위해 HEC-1 모형을 사용하여 유출분석을 실시하였다. HEC-1 모형은 미공병단에 의해 여러 해에 걸쳐 개발되었다. 자연하천 유역에 대하여 HEC-1 모형은 소유역 유출, 하도와 저수지 추적 및 수문곡선 합성을 위한 기본적인 구성성분들을 가지고 있다. 유역에서의 홍수량 산정은 SCS CN 손실방법과 대규모 유역에 적용 가능한 Clark 유역추적 방법 및 Muskingum 하도추적 방법을 사용하여 모의를 수행하였다.

유역의 홍수량을 산정하기 위한 기초자료인 강우량은 자동

기상관측소의 강우량 자료와 위성정보에 의해 추정된 강우량 자료를 신경망 모형의 입력값으로 사용하여 예측하였다. 예측된 강우량 자료를 이용하여 유역에서의 홍수량을 산정하였고, 산정된 각 소유역의 홍수량은 홍수범람 해석에서의 경계조건으로 고려되었다.

4.2 하천홍수 해석

일반적으로 부정류 흐름의 1차원 방정식은 흐름의 검사체에 적용된 질량보존과 운동량보존의 물리적 이론과 관련되어 있다. 이런 물리적 이론을 편미분방정식인 연속 방정식과 운동량 방정식으로 표현한 것이 St. Venant 방정식이며 Eqs. (2) and (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_o)}{\partial t} - q = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L + W_f B = 0 \quad (3)$$

여기서 Q = 유량, A = 흐름단면적, A_o = 저류단면적, q = 측방유입량, h = 수위, S_f = 마찰경사, S_e = 단면 확대 · 축소에 의한 손실경사, L = 지류에 의한 운동량의 변화, W_f = 비람에 의한 응력, B = 하도폭, x = 거리, t = 시간이다.

St. Venant 방정식은 쌍곡선형, 비선형, 편미분계 함수로서 특수한 경우를 제외하고는 해석해가 존재하지 않지만 여러 수치해석 기법에 의해 근사해를 얻을 수 있다. 유한차분 기법에서는 미분방정식이 차분화된 비선형 대수방정식으로 표현되며, 이러한 대수방정식에는 초기 및 경계조건을 이용하여 해석이 가능하게 된다. 본 연구에서는 St. Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 유한차분 기법들 중 Preissmann의 가중 4점 음해법을 이용하여 1차원 홍수파를 해석하였다. Preissmann 기법에서 임의 변수 또는 함수 f 의 시간 및 공간에 대한 편미분의 형태는 Eqs. (4)~(6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1} - f_i^j - f_{i+1}^j}{2\Delta t^j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x_i} \quad (5)$$

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{j+\theta} = \frac{\theta}{2}(f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1}) + \frac{(1-\theta)}{2}(f_i^j + f_{i+1}^j) \quad (6)$$

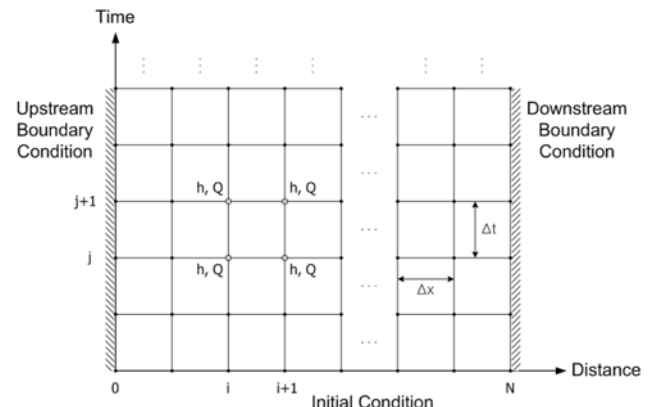


Fig. 8 Temporal and spatial coordinates of Preissmann scheme

Eqs. (4)~(6)에서 나타난 유한차분 근사식을 St. Venant 방정식에 대입하여 정리하면 차분화된 연속 방정식과 운동량 방정식을 얻을 수 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 차분화된 연속 방정식과 운동량 방정식은 시간 $j+1$ 에서 i 와 $i+1$ 점에 대한 미지수 h , Q 의 비선형 방정식이다. 따라서 초기 및 경계조건을 대입하면 $2N$ 개의 미지수를 가진 $2N$ 의 비선형 방정식은 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해가 구해지게 된다.

4.3 홍수범람 해석

하천제방의 월류 및 붕괴에 의해서 하천수가 범람하는 경우에는 하천에 대한 홍수와 해석과 제내지에서의 홍수범람 해석을 병행하여 해석을 하여야 한다. 범람홍수량에 대한 수문곡선을 유도하기 위해서는 하도에서의 홍수위, 붕괴부의 형상 및 제내지의 침수위를 고려하여, 제방월류로 인한 범람의 경우에는 광정웨어 공식이 사용되고 파이핑에 의한 범람의 경우에는 오리피스 공식이 기본적으로 사용된다. 즉, 임의시간 t 에서 총범람유출량 $Q_b(t)$ 는 Eq. (7)과 같이 표현된다.

$$Q_b(t) = C_1(h-h_b)^{1.5} + C_2S(h-h_b)^{2.5} + C_3a(h-h_0)^{0.5} \quad (7)$$

여기서 C_1 , C_2 , C_3 는 각각 넓은마루를 가진 직사각형웨어, 삼각형웨어 및 오리피스의 유량계수이고, h , h_b 는 각각 임의의 시간에서 하천수위 및 파괴부의 높이, n 는 파이핑 발생높이, h_0 는 파이핑 발생 단면적이며 a 는 잠수계수이다.

제방월류 및 붕괴지점이 선정되고 파제유량이 계산되면, Fig. 9에 제시된 바와 같이 제방월류로 인해 제내지의 침수위가 높아짐에 따라 제내지에서 하도로 역류가 발생하는 경우를 해석하기 위해 다음 하류단면이나 다음 시간에 대해 월류량을 계산할 경우 하도내 홍수위와 제내지의 수위를 비교하여, 제방월류량이 계속 발생할 것인지 역류현상이 발생할 것인지를 판단하여 제내지 침수특성 분석과 다음 단계 하도에서의 홍수위 추적을 수행하게 된다.

본 연구에서 개발된 홍수범람 모형은 국가하천인 본류와 소규모 지방하천인 지류의 여러 지점에서 제방이 붕괴될 경우, 하도의 홍수위 및 제내지에서의 침수위와 침수면적이 일괄적으로 모의될 수 있도록 구성하였다.

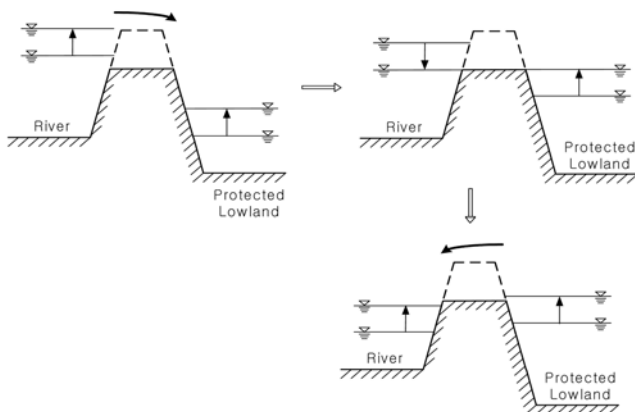


Fig. 9 Inundation aspect due to flood level and inundation level

5. 결 론

본 연구에서는 하천의 제방붕괴에 따른 홍수위험 지역에서 침수양상을 체계적으로 예측하고 분석하기 위해서 실시간 홍수범람 해석의 전 과정을 통합하여 해석하였다. 이를 위해 높은 시공간 분해능을 가지는 위성정보를 활용한 강우 예측 신경망 모형을 개발하여 강우-유출 해석의 기본이 되는 면적평균강우량을 예측하였으며, 예측된 강우량 자료를 이용하여 홍수량을 산정하고 이를 홍수범람 해석의 기본자료로 사용하였다. 또한 하천의 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람홍수의 전파양상을 효율적으로 계산할 수 있는 홍수범람 모형을 개발하였다.

강우예측 신경망 모형은 관측된 강우자료의 품질과 패턴이 모형의 정확성에 미치는 영향이 절대적인 기존의 신경망 모형과 차별화하여, 현재의 대기상태를 나타내는 인공위성 자료와 실시간으로 전송되는 강우량의 실측치인 자동기상관측소 자료를 입력자료로 하여 현재부터 3시간 및 6시간 선행시간까지의 면적평균강우량을 예측할 수 있도록 구성하였다. 신경망 모형의 구조는 입력층과 출력층 사이에 하나의 은닉층이 존재하는 다층 신경망으로 구성하였으며, 학습단계에서는 오류 역전파 알고리즘 학습방법 중 모멘텀법을 사용하였다.

본 연구를 통해서 정량적인 강우예측에 대한 위성분석 자료의 실질적인 활용성을 제공하였으며, 실시간 강우예측 기법과 홍수유출 및 홍수범람 모의를 연계하여 해석함으로써 홍수재해에서의 강우-유출-홍수추적-범람에 대한 일괄적인 실무 적용에 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

- 김종해, 한건연, 서규우(2003) 하천 홍수범람모의를 위한 불확실도 해석기법의 적용. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권 제4호, pp. 661-671.
- 한건연, 이종석, 김상호(1997a) 댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발 : I. 모형 및 이론. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권 제6호, pp. 679-690.
- 한건연, 이종석, 김상호(1997b) 댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발 : II. 적용예. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권 제6호, pp. 691-698.
- Adler, R.F. and Negri, A.J. (1988) A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 27, pp. 30-51.
- Arkin, P.A. (1979) The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *Monthly Weather Review*, Vol. 107, pp. 1382-1387.
- Barrett, E.C. and Martin, D.W. (1981) *The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring*. Academic Press, New York, pp. 340.
- French, M.N., Krajewski, W.F., and Cuykendall, R.R. (1992) Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *Jour-*

- nal of Hydrology*, Vol. 137, pp. 1-31.
- French, M.N., Andrieu, H., and Krajewski, W.F. (1994a) A model for real-time quantitative rainfall forecasting using remote sensing: 1. Formulations. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 1075-1083.
- French, M.N., Andrieu, H., and Krajewski, W.F. (1994b) A model for real-time quantitative rainfall forecasting using remote sensing: 2. Case Studies. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 1085-1097.
- Griffith, C.G., Woodley, W.L., Grube, P.G., and Martin, D.W. (1978). Rain estimation from geosynchronous satellite imagery: Visible and infrared studies. *Monthly Weather Review*, Vol. 106, pp. 1153-1171.
- Han, K.Y., Kim, K.S., and Choi, K.H. (2004) Inundation analysis for basinwide flood management. *The 3rd Seminar on the Technology of Disaster Management on Urban Flood*, Seoul, Korea.
- Han, K.Y., Lee, J.T., and Choi, K.H. (2003) Levee breach and flood inundation modeling in urban areas. *30th IAHR Congress*, Greece.
- Han, K.Y., Lee, J.T., and Park, J.H. (1998) Flood inundation analysis resulting from levee-break. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, No. 5, pp. 747-760.
- Kidder, S.Q., and Vonder Haar, T.H. (1995) *Satellite Meteorology: An Introduction*, Academic Press, New York, pp. 466.
- Levizzani, V., Prcu, F., Marzano, S., Mugnai, M., Smith, E.A., and Pordi, F. (1996) Investigating a SSM/I microwave algorithm to calibrate Meteosat infrared instantaneous rainrate estimates. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 3, pp. 5-17.
- Negri, A.J. and Adler, R.F., and Wetzel, P.J. (1984) Rain estimation from satellites: an examination of the Griffith-Woodley technique. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, Vol. 26, pp. 1565-1576.
- Saint-Venant, A. (1871a) Theorie du mouvement non permanent des eaux avec application aux crues des rivieres et a l'introduction de mares dans leurs lits. *Comptes rendus des seances de l'Academie des Sciences*, Vol. 36, pp. 154-174.
- Saint-Venant, A. (1871b) Theorie du mouvement non permanent des eaux avec application aux crues des rivieres et a l'introduction de mares dans leurs lits. *Comptes rendus des seances de l'Academie des Sciences*, Vol. 36, pp. 237-240.
- Seo, D.J. and Smith, J.A. (1992) Radar-based short-term rainfall prediction. *Journal of Hydrology*, Vol. 131, pp. 341-367.

(접수일: 2006.2.7/심사일: 2006.6.18/심사완료일: 2006.8.28)