

중소하천유역에서의 홍수예보 및 예측에 관한 연구

Study of Flood Warning and Forcasting in Small to Medium scale Watershed

김경탁*·김주훈 *·최윤석**

Kyung Tak Kim*·Joo Hun KIM*·Yun Seok Choi**

요 지

중랑천, 왕숙천 등과 같이 유역면적이 작은 유역에서 호우 발생에 따른 홍수예보 및 예측 업무를 수행하기 위해서는 선행시간 확보가 필수적이다. 본 연구는 중소하천 유역에서의 홍수예보 및 예측 업무를 통하여 하천 주요지점에서의 홍수예보 업무를 효과적으로 수행할 수 있도록 하는데 목적이 있다. 연구방법으로는 선행시간 확보를 위해 기상청의 수치예보자료에 대하여 정량적 강우예측 자료 활용방안을 검토하였다. 수치예보자료의 정확도 검토는 관측소별/소유역별로 구분하여 T/M자료와 수치예보자료를 통계학적 방법에 의해 검토하였다. 홍수예보 업무 활용을 위해 간단한 강우-유출 통계모형을 구성하여 홍수예측 업무를 수행하였다. 검증자료는 기왕의 수문자료 중 80mm 이상의 호우를 대상으로 실시하였고, 검증결과 활용가능성이 있음을 입증하였다. 본 연구성과를 기존의 주요지천 홍수예보업무에 활용할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

하천의 중요지점에 대한 홍수예보를 발령하기 위해서는 유역으로부터의 유출현상을 예측해야 하는데 이는 기본적으로 관측 또는 예측된 강우 입력자료를 이용하여 유량을 예측하는 강우-유출 분석을 수행하여야 한다. 그러나 중랑천과 같이 유역면적이 작은 중소하천 유역에서 호우 발생에 따른 홍수예보 업무를 수행하기 위해서는 선행시간 확보가 필수적이다.

중랑천 유역의 경우 홍수예보지점인 중랑교 지점을 기준으로 유역면적이 266km²이고 도달시간이 Kerby, Kraven 등의 경험식에 의하면 3시간 이내로 매우 짧아 홍수예보를 위한 선행시간 확보가 필수적이다. Reed(1984)는 홍수 도달시간이 3시간 이하인 유역에서의 홍수예보를 할 경우 적정 홍수 예보를 위해 강우-유출모형과 더불어 정량적 강수 예측자료(Quantitative Precipitation Forecast ; QPF)를 활용하여야 한다고 지적한 바 있다. 따라서 충분한 홍수예보 선행시간을 갖기 힘든 중랑천 유역에 대한 홍수예보 및 예측 업무를 효과적으로 수행하기 위해서는 정량적 강수예측이 필수적이며, 이 경우 강수예측자료의 정확도에 따라 홍수예보의 정확성이 결정된다. 비록 홍수예보의 정확도가 정량적 강수예측자료의 정확도에 의존할 수 밖에 없지만 충분한 선행시간을 확보할 수 없는 중소규모하천에서의 홍수예보를 위해서는 어쩔 수 없는 현실이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 한강수계의 주요지천을 대상으로 홍수예보 및 예측 업무를 효과적으로 수행하기 위하여 강수예측 부분에서 수치예보자료의 활용가능성과 자료의 정확도에 대하여 검토하고, 기존의 수문학적 홍수예측 모형과 더불어 통계학적 홍수예측 모형에 의한 홍수예측 시스템을 도입하여 홍수예보 및 예측 업무에 기여코자하는데 목적이 있다.

2. 수치예보자료

기상청 수치예보과에서는 1991년 12월 국내에서는 최초로 극동아시아 예보 모형인 F-LAM(Far East Limited Area Model)과 파랑 예보 모형(해상풍과 파고예보)을 정규적인 현업에 적용하여 1일 2회(00UTC와 12UTC) 예보를 실시하기

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원·E-mail:ktkim1@kict.re.kr

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원·E-mail:jh-kim@kict.re.kr

** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원·E-mail:yschoi51@kict.re.kr

시작하였다. 이후 일본 기상청으로부터 기술 지원을 받아 1993년에 전지구 모형을, 1994년에는 자료 동화 과정을 기상청 자체 시스템에 적합하도록 변환하여 전지구 예보 시스템(GDAPS ; Global Data Assimilation and Prediction System)을 개발하게 되었다. 그리고 GDAPS에서 맞추어 지역예보시스템(RDAPS ; Regional Data Assimilation and Prediction System)을 포함하여 태풍 모형, 일기도 분석 등에 관한 전반적인 수치 예보 시스템에 대한 수정작업이 실시되었다.

또한, 1996년에는 자료 동화 과정을 포함한 전지구 예보 모형(GCM ; Global Spectrum Model)과 새로운 제한 지역 모형(RGM ; Regional Grid Model)을 개발하게 되었다. 이때 RGM의 경우에는 향후 전지구 모형의 수평 분해능이 세분화될 것을 대비하여 F-LAM과 K-LAM을 조합하여 하나의 새로운 제한 지역 모형으로 재구성하였고, 관측 자료와 예보 자료의 흐름을 상호 연계시켜 RDAPS를 구축하여 양질의 초기조건을 확보할 수 있게 되었으며 예보 자료간의 연속성을 유지시킬 수 있게 되었다. 또한 RDAPS에 연계되는 과량 예보 모형, 최고 및 최저 기온 예보 모형 및 강수 확률 모형을 재구성하였다.

RDAPS 모델은 30km 격자간격의 아시아영역 예보, 10km 격자간격의 한반도 및 주변영역 예보 그리고 5km 격자간격의 한반도 예보가 수행되고 있으며, 모두 33개의 연직층으로 구성되어 있다. 아시아영역 예보의 경우 48시간 예보를 수행하고 있으며, 나머지는 24시간 예보를 수행하고 있다.

2.1 수치예보자료의 활용성 검토

본 연구에서 사용한 수치예보자료는 지역예보모델로 이는 MM5와 기상레이더 자료 그리고 기상위성자료, AWS 등을 이용하여 예측하는 자료이다. 이 수치예보는 5km 격자간격을 갖는 고해상도 RDAPS자료로 00UTC와 12UTC에 향후 24시간동안의 예측 강우를 1시간 간격으로 제공하는 자료이다. 한편, 기상청 슈퍼컴퓨터에서 수치예보프로그램 가동 후 자료 처리, 모형구동, 자료변환 등의 각 과정을 거치고 기상청 내의 각 서버를 거쳐 한강홍수통제소로 전송되므로 실제로는 00UTC 자료(한국시간 오전 9시)는 6시간 24분후인 한국시간 오후 3시 24분경에 한강홍수통제소 DB에 저장되고 있다.

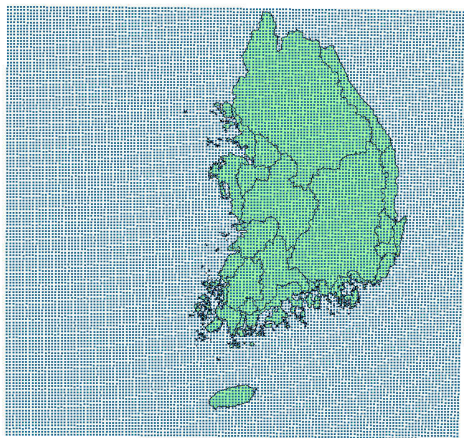


그림 1. 수치예보자료의 격자 포인트

기상청에서 한강홍수통제소로 제공되는 5km 격자의 수치예보자료는 강우 자료를 포함한 다양한 기상정보가 함께 압축된 형태로 제공되고 있으며, 그 용량은 약 80MB가 된다. 데이터 맵핑은 램버트 컨포멀(Lambert conformal conic projection)로 지구반경 6370.19584m, 표준위도 N60, N30, 중심위경도 N30, E126이며, 중심 격자는 X방향 57.5, Y방향 -63.7을 채택하고 있다. 5km 간격의 수치예보 포인트는 동서방향으로 141개 남북방향으로 141개의 격자를 구성하고 있다.

본 연구에서는 이를 TM(Transverse Mercator, 횡단원통등각투영법) 좌표계로 전환하여 이용하고 있으며, 그림(1)은 기상청에서 제공되는 5km 수치예보자료의 격자 포인트를 TM 좌표계에서 나타낸 것이다.

강우자료의 경우 그림(1)에서의 각 격자는 좌우상하 방향으로 각각 2.5km의 영역을 대표하고 있으며, 따라서 수치예보 포인트는 5km × 5km 영역에 대한 중심점에서의 강우량을 나타내고 있다.

2.2 수치예보자료의 정확도 검토

본 연구에서는 중랑천 유역내 강우관측소의 T/M자료와 각 관측소별로 그리고 T/M자료의 소유역 평균 강우량과 수치예보자료의 평균강우량 자료에 대하여 수치예보자료의 활용성을 검토하였다. T/M자료 및 수치예보자료의 비교를 위한 자료는 2005년 5월 1일부터 2005년 9월 15일까지의 각 강우관측소별 T/M자료와 수치예보자료 중에서 강우관측소와 가장 가까운 수치예보자료를 비교하였다. 그림(2)는 중랑천 유역의 우이우량관측소의 T/M자료와 수치예보자료에 대하여 비교한 것이고 그림(3)은 5번 소유역의 평균강우량 자료와 수치예보자료의 평균강우량 자료를 비교한 그래프이다.

수문학적 홍수예측 모형에서의 홍수량 예측자료의 정확성을 높이기 위하여 현재 이용 가능한 예측자료로는 수치예보자료가 타당한 것으로 평가되었으나, 이 수치예보자료의 정확도에 대한 검증결과 2005/06/30 ~ 07/01의 강우사상에 대한 T/M우량자료와 수치예보자료간의 상관계수가 우이 우량관측소의 경우 0.96, 퇴계원 우량관측소의 경우 0.82로 높은 상관성을 보이는 경우도 있으나, 의정부 우량관측소는 0.23, 진접 우량관측소는 0.02로 상관성이 거의 없는 것으로 나타났으며,

2005/07/27 ~ 07/31의 강우사상의 경우 모든 관측소에서 역(-)상관을 갖는 것으로 분석되었다. 소유역별 T/M 평균강우량 자료와 수치예보의 평균강우량 자료를 비교했을 때에도 상관성이 거의 없는 것으로 분석되는 등 대부분의 경우에는 T/M 자료와 수치예보자료간 많은 차이를 보이고 있어 수치예보자료를 수문학적 홍수예보업무의 강우예측 자료로 그대로 사용하기에는 부적절 한 것으로 판단되며, 지속적인 자료수집과 검증작업을 수행한 후 수치예보자료의 정확도를 재검증하고 이후 수치예보자료와 T/M자료와의 상관성 분석 및 가중치 부여방법 등을 고려한 후 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

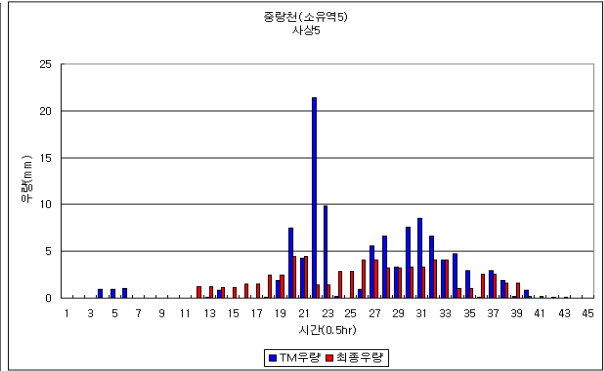
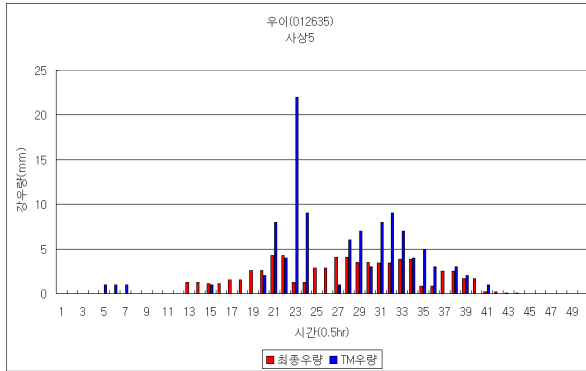


그림 2. 우이우량관측소(T/M-수치예보자료) 그림 3. 소유역(소유역-5)별 T/M-수치예보자료

표 1. 관측소 및 소유역별 사상별 총우량 통계자료(T/M, 수치예보자료)

관측소명/ 소유역명	호우기간	T/M우량 (mm)	최종우량 (mm)	총우량 상대오차(%)	침투 상대오차(%)	RMSE	상관계수	효율지수
우이	2005/06/26-06/27	129.0	71.4	44.65	8.63	5.03	0.42	0.07
	2005/06/30-07/01	73.0	30.4	58.37	1.00	3.00	0.96	0.59
	2005/07/27-07/28	84.0	5.4	93.60	1.00	4.55	-0.06	-0.29
	2005/08/10-08/12	115.0	111.0	3.44	3.31	4.55	-0.01	-1.26
	2005/09/13-09/14	108.0	70.4	34.81	3.09	3.87	0.40	0.12
소유역4	2005/06/26-06/27	119.0	75.0	37.00	8.13	4.10	0.40	-0.01
	2005/06/30-07/01	47.0	12.7	72.94	1.00	2.64	-0.06	-0.17
	2005/07/27-07/28	91.2	5.0	94.48	1.00	4.56	-0.08	-0.35
	2005/08/10-08/12	121.0	123.7	2.21	15.69	4.45	0.03	-1.32
	2005/09/13-09/14	90.0	72.1	19.90	1.97	4.12	0.23	0.03

3. 통계학적 방법에 의한 홍수예측

본 연구의 대상유역인 중랑천 유역의 경우 대부분의 강우/수위관측소가 2002년부터 관측을 개시하여 홍수예보 업무에 활용하고 있다. 본 연구에서는 이들 유역의 우량관측소 관측 자료 중 80mm 이상의 호우사상을 수집하여 통계학적 모형의 매개변수 산정 및 모형의 적합성 여부를 검증하였다.

통계학적 홍수예측 모형 개발을 위한 호우사상 선정은 호우 원인별로 기압골과 전선형, 태풍 등을 종합하여 침투 홍수량이 크고 지속기간이 짧은 호우 사상을 선정하였으며, 2002/07/05 ~ 07/07의 전선형 호우사상을 선정하여 통계학적 매개변수 산정에 이용하였다.

통계학적 홍수예측 모형의 독립변수는 다음과 같이 예보지점의 수위/유출량 자료와 상류지점의 수위/유출량 자료, 그리고 유역의 선행 평균강우량 등의 자료를 독립변수로 하여 통계학적 홍수예측을 위한 다중선형 회귀모형을 각각 구성하여 독립변수의 적합성을 판단하였다.

- 홍수예보지점의 세시간 이전 유역 평균강우량 자료와 유출량 자료
- 홍수예보지점의 세시간 이전 유역 평균강우량 자료와 수위 자료
- 홍수예보지점의 세시간 이전 유출량 자료

■ 세시간 이전 분류 및 지류의 상류지점 수위, 홍수예보지점 수위, 평균강우량 자료

상기와 같이 독립변수를 구성하여 분석한 결과를 바탕으로 세 시간 이전의 유역 평균강우량자료와 예보지점의 유출량 자료를 이용하여 다중선형회귀 홍수예측 모형을 구성하였을 때 가장 좋은 결과를 나타내는 것으로 분석되었다.

표 2. 통계모형 매개변수

매개변수	30분	60분	90분	120분	150분	180분
c	0.019	0.115	0.269	0.466	0.706	0.987
a_1	1.667	1.820	1.683	1.717	1.705	1.596
a_2	-0.992	-1.438	-1.263	-1.393	-1.550	-1.635
a_3	0.360	0.837	0.759	0.787	0.836	0.685
a_4	0.122	-0.076	-0.034	-0.054	-0.217	-0.015
a_5	-0.178	-0.194	-0.372	-0.617	-0.563	-0.722
a_6	0.000	-0.017	0.100	0.368	0.525	0.744
b_1	1.333	2.557	3.885	5.008	6.065	6.912
b_2	-1.015	-1.105	-1.077	-1.167	-1.319	-1.362
b_3	0.823	1.257	1.334	1.464	1.649	1.875
b_4	-0.393	-0.656	-0.618	-0.658	-0.571	-0.179
b_5	0.097	0.195	0.032	0.124	0.435	0.433
b_6	-0.316	-0.771	-0.948	-0.953	-1.116	-1.084

$$Q(t+n) = a_1Q(t) + a_2Q(t-1) + \dots + a_{m+1}Q(t-m) + b_1R(t) + b_2R(t-1) + \dots + b_{n+1}R(t-m) + c \quad (1)$$

여기서, Q 는 유출량, R 은 대상지점 상류유역의 평균강우량, a_1, a_2, \dots, a_{m+1} 은 대상지점의 유출량 관련 매개변수, b_1, b_2, \dots, b_{n+1} 는 대상지점의 유역평균 강우량 관련 매개변수, c 는 절편 매개변수이며, n 은 선행예측시간을 나타낸다.

유역의 3시간 이전 평균 강우량과 3시간 이전 유출량 자료를 이용하여 통계모형을 구성한 매개변수에 대한 적합성 분석 결과 상관계수가 1.0 ~ 0.89와 같이 매우 우수한 결과를 나타냈다. 이 결과에 대한 통계학적 홍수예측 모형의 매개변수를 표(2)와 같이 산정하였다.

4. 홍수량 예측

홍수량 예측을 위한 수문자료는 2002년부터 2005년 9월까지의 강우량 중에서 80mm 이상의 호우를 대상으로 적용하였다. 통계학적 모형의 검증은 평균제곱근오차, 상대최대오차, 효율지수, 상관계수, 평균절대편차, 그리고 절대평균편차와 평균값 사이의 비인 RAD, 그리고 홍수예측에서 가장 중요한 요소인 상대첨두오차와 상대첨두시간오차를 모형의 적합성 판정을 위한 통계치로 사용하였다.

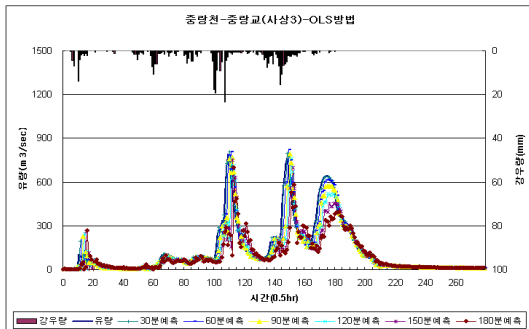


그림 4. 통계학적 홍수예측 결과

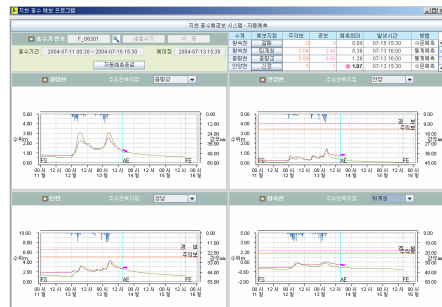


그림 5. 4개유역 동시 홍수위 예측

30분예측 유출량의 경우 상관계수가 0.92~1.00으로 매우 높은 상관관계를 보이고 있으며, 60분예측에서도 0.85~0.99, 그리고 90분예측에서는 0.77~0.98로 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 효율지수의 경우에도 30분예측의 경우 0.89~0.99로 매우 높은 결과를 나타내고 있다.

상대첨두오차는 작은 경우에는 0.63%, 큰 값의 경우에는 약 30% 정도 되지만 대체로 매우 양호한 결과를 나타내고 있으며, 상대첨두시간 오차는 30분 예측값의 경우 매우 정확한 값을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 통계모형에 의한 홍수예측 결과 30분에서 90분 예측은 상대적으로 정확한 결과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

또한 기존의 수문학적 홍수예측 모형인 저류함수 모형의 매개변수를 재조정하고 주요지천의 홍수예보 프로그램을 개선하여 수문학적 홍수예측 모형이 한강수계 주요지천 4곳 중랑천, 왕숙천, 안양천, 탄천유역을 동시에 30분 간격으로 자동으로 실행되도록 시스템을 조정하였고, 상기의 통계학적 홍수예측 모형도 동시에 홍수위를 예측할 수 있도록 시스템을 보완하였다(그림 5).

5. 결론

본 연구는 기존의 수문학적 홍수예측 모형에 대하여 수치예보자료를 이용한 정량적 강수예측자료의 활용성을 검토하고, 또한 통계학적 홍수예측 모형을 구성하여 각각의 모형을 기존의 수문사상에 적용하여 적합성을 검증하여 이들 모형들을 이용한 중소하천 유역에서의 홍수예보 및 예측 업무를 효과적으로 수행할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

수치예보자료의 정확도 검증결과 T/M우량자료와 수치예보자료간의 상관계수가 일부 우량관측소에 대해서는 상관계수가 0.8이상로 높은 상관성을 보이는 경우도 있으나, 대부분의 우량관측소는 0.2이하로 상관성이 거의 없는 것으로 나타났으며, 일부 강우사상의 경우 모든 관측소에서 역(-)상관을 갖는 것으로 분석되었다. 소유역별 T/M 평균강우량 자료와 수치예보의 평균강우량 자료를 비교했을 때에도 상관성이 거의 없는 것으로 분석되는 등 대부분의 경우에는 T/M자료와 수치예보자료간 많은 차이를 보이고 있어 수치예보자료를 수문학적 홍수예보업무의 강우예측 자료로 그대로 사용하기에는 부적절한 것으로 판단되며, 계속적인 자료수집과 검증작업을 수행한 후 수치예보자료의 정확도를 재검증하고 이후 수치예보자료와 T/M자료와의 상관성 분석 및 가중치 부여방법 등을 고려한 후 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

홍수예측에서는 통계학적 홍수예측 모형에 의한 홍수예측 방법을 추가하여 홍수예보 및 예측 업무에 활용할 수 있도록 하였다. 통계학적 홍수예측 모형의 입력인자는 해당지점의 유출량과 유역 평균강우량 자료를 이용하였고 향후 3시간까지의 홍수위를 예측할 수 있도록 하였고, 기왕의 수문사상에 적용한 결과 30분에서 90분예측까지는 매우 상관성이 높은 결과를 나타내었다.

기존의 주요지천의 홍수예보시스템을 개선하여 매개변수를 재조정하고 수문학적 홍수예측 모형과 더불어 통계학적 홍수예측 모형이 30분 간격으로 자동으로 실행되도록 시스템을 구축하였으며, 두 모형의 예측값 중 어느 한 값이라도 홍수위험수위에 도달하면 경보음을 통해 예보관에게 주의를 기울이도록 시스템을 구성하여 중소하천 유역에서의 홍수예보 업무에 활용할 수 있게 하였다.

참고문헌

- 건설교통부/한강홍수통제소(2005). "주요지천홍수예보프로그램 개선"
- 경기도(2003) "중랑천수계 하천정비기본계획재정비"
- 기상청(2003). "수치예보시스템의 검증". KMA NWPD Technical Report 2004-3.
- 김진훈, 윤원진, 배덕효(2005). "단기예측강우를 활용한 실시간 유량 예측기법 적용." 한국수자원학회논문집 제38권 제1호, 한국수자원학회, pp11-23
- 배덕효, 김진훈, 조천호(2004). "한강유역의 돌발홍수 예보 체계 구축." International Workshop on Living with Risk 발표자료.
- 서울특별시(2000). "중랑천 하천정비기본계획"
- 윤강훈, 김태균(2004). "레이더 예측 강우를 이용한 다중회귀 예측모형의 적용가능성 평가", 대한토목학회 24(4b):0-5.