

레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립

Ⅲ. 2차원 홍수범람 모의

Development of a Flood Runoff and Inundation Analysis System Associated With 2-D Rainfall Data Generated Using Radar : Ⅲ. 2-D Flood Inundation Simulation

최규현* / 한건연** / 김상호*** / 이창희****

Choi, Kyu Hyun / Han, Kun Yeun / Kim, Sang Ho / Lee, Chang Hee

Abstract

In this study, a 2-D flood inundation model was developed to evaluate the impact of levee failure in a natural basin for flood analysis. The model was applied to analyze the inundation flow from the levee break of Gamcheon river during the typhoon Rusa on October 31 through September 1, 2002. To verify the simulated results, wide range field surveys have been performed including the collection of NGIS database, land use condition, flooded area, and flow depths. Velocity distributions and inundation depths were presented to demonstrate the robustness of the model. Model results have good agreements with the observed data in terms of flood level and flooded area. The model is able to compute maximum stage and peak discharge efficiently in channel and protected lowland.

Methodology considering radar-rainfall estimation using cokriging scheme, flood-runoff and inundation analysis in this study will contribute to the establishment of the national integrated flood disaster prevention system and the river or protect lowland management system.

keywords : 2-D numerical model, flood inundation simulation, radar, cokriging

요 지

본 연구에서는 하천 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람홍수의 진과양상을 효율적으로 계산할 수 있는 2차원 범람홍수모형을 개발하였다. 또한 범람모의를 위한 기본 입력자료 구축을 위해서 레이더 자료와 연계하였으며, 레이더 정량강우-홍수유출-범람해석에 대한 통합시스템을 구축하였다. 개발된 모형의 검증을 위해서 태풍 루사로 인한 감천 지역의 실제 제방붕괴 사례에 대한 적용을 실시하였으며, 범람모의를 위한 기본자료인 강우량을 산정하기 위해서

* 정희원, 건설교통부 한강홍수통제소 하천정보센터 토목연구사 · 공학박사
Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office, MOCT, Seoul, 137-649, Korea.
(e-mail: khchoi@moct.go.kr)

** 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사
Professor, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea.
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

*** 정희원, 상지대학교 이공과대학 건설시스템공학과 조교수 · 공학박사
Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea.
(e-mail: kimsh@sangji.ac.kr)

**** 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 강사 · 공학박사
(e-mail: changheel@gmail.com)

레이더 자료와 연계하였고, 지상의 강우관측자료와 최적으로 조합하기 위한 cokriging 기법을 적용하였다. 레이더와 연계한 2차원 정량강우량은 유역에서의 홍수량 산정을 위해 이용되었으며, 유역에서의 홍수량은 하도 및 제내지에서의 홍수범람모의를 위해 이용되었다. 모의결과는 실제 홍수흔적과 하천에서의 홍수위 자료 등과 비교하여 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 2차원 수치모형, 홍수범람 모의, 레이더, cokriging

1. 서 론

최근에 들어 지구 온난화 현상에 의한 기상이변이 지구촌 곳곳에서 발생되고 있는데, 2002년 8월 중순 독일을 비롯한 중부 유럽을 휩쓴 대홍수와 2001년 시속 167 km인 태풍 도라지의 영향으로 화렌 지방과 난타우 지방의 극심한 피해가 그 대표적인 예이다. 우리나라 역시 지난 2002년 8월 4일부터 11일까지 집중된 호우로 인해 지반이 취약해진 가운데 한반도를 내습한 태풍 루사로 인해 낙동강 유역 및 강원도 지역에서 많은 저수지와 제방이 붕괴되는 피해가 발생했으며, 잇따른 피해들은 이 분야에 대한 종합적인 연구의 필요성을 증대시켰다. 이제까지 이 분야에 대한 연구는 주로 강우-유출해석에 치우쳐 있으며, 강우예보-유출해석-홍수범람양상이 체계적으로 연구되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이더 자료를 홍수범람모형과 실시간으로 연계·구동할 수 있는 체계를 구축하고 이에 대한 적용성을 규명하고자 한다.

하천 제방 붕괴로 인한 범람 홍수파의 해석에 대한 연구는 주코 댐 붕괴의 문제와 연관되어왔는데, Fread(1988) and Singh(1996)은 댐 붕괴시 시간의 경과에 따른 결피부의 형상에 대한 연구와 댐의 붕괴로 인한 홍수파의 유속 및 수심이 시간과 거리가 증가함에 따라서 감쇠됨을 보였다. 또한 댐 붕괴 홍수파의 감쇠는 붕괴유출수문곡선의 상승부 시간과 역비례함을 여러 연구자들의 연구결과와 실험사례를 통해 확인할 수 있다(Chen and Armbruster, 1980; Petrascheck and Sydler, 1984; Ponce, 1989). 유럽에서는 댐 붕괴로 인해 댐 하류부 및 제내지에서 발생하는 홍수파의 수치모의를 위해, EDF(Electricité de France)와 HR(Hydraulic Research Wallingford)에서 유럽인들의 댐 붕괴 문제와 연관된 모임인 CADAM(Conserted Action on Dam-break Modeling) 프로젝트를 시작하였다. 2차원 범람홍수의 흐름에 대한 수치모형들이 CADAM을 통해 많이 연구되었다(Bradford and Sanders, 2002; Brufau and Garcia-Navarro, 2000; Garcia-Navarro et al., 1995; Jha et al., 2000; Sleigh et al., 1998). 그러나, 모든 연구모형들은 범람수심의 예측에 대한 내용들을 주

로 다루고 있으며, 하도 및 홍수터에서의 범람유속에 대한 자세한 언급이 없으며, 기상·강우와 연계된 종합적 연구 또한 매우 부족한 실정이다.

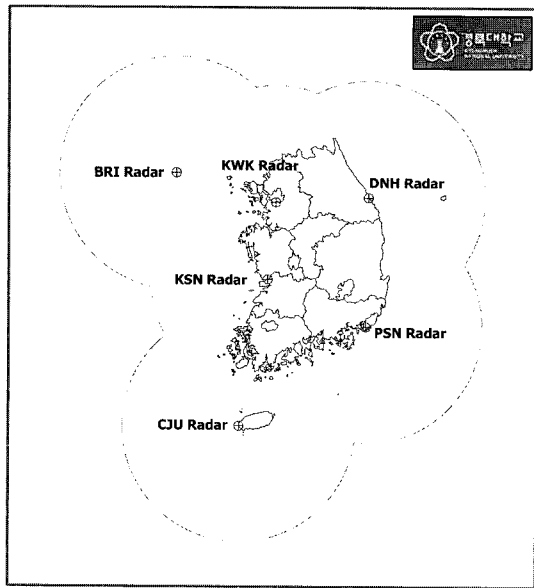
국내에서 제방붕괴로 인한 홍수범람에 대한 연구로는 최규현과 한건연(2005a; 2005b)이 댐 및 제방붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형을 개발하였으며, 이홍래 등(1998a; 1998b)이 DWOPER 모형을 이용한 제방월류 및 붕괴에 따른 하도 및 제내지에서의 범람해석 등을 처리할 수 있는 프로그램을 Arc/Info와 연계하여 개발하였다. 김종해 등(2003)은 홍수위 계산에 있어서 도입되는 불확실성의 원인을 분석하고 정량화하여 확률론적 홍수위 계산을 실시함으로써 제방월류에 대한 제내지의 범람특성을 해석할 수 있는 모형을 개발하였다. 이정규와 김태관(2003)은 1차원 댐 붕괴 문제의 계산을 위해 TVD-McCormack 기법을 이용하였다.

그러나, 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람양상을 체계적이고 효율적으로 분석하기 위한 기상-강우-유출-범람의 전 과정을 통합·해석하는 종합적인 재해방지시스템에 대한 연구는 전 세계적으로 전무한 실정이다. 또한 레이더를 이용한 신뢰성 있는 강우량을 산출한 예는 있으나, 이를 범람해석 및 유역에서의 비상대처계획 등의 홍수방재에 직접적으로 적용한 사례는 없다. 따라서 본 연구는 레이더를 이용한 강우량 산출에서부터 유역에서의 홍수량 계산 및 이로 인한 범람홍수의 계산을 정밀히 수행할 수 있는 해석기법을 개발함으로써 국내 수자원 및 방재 차원에서 크게 기여하고자 한다.

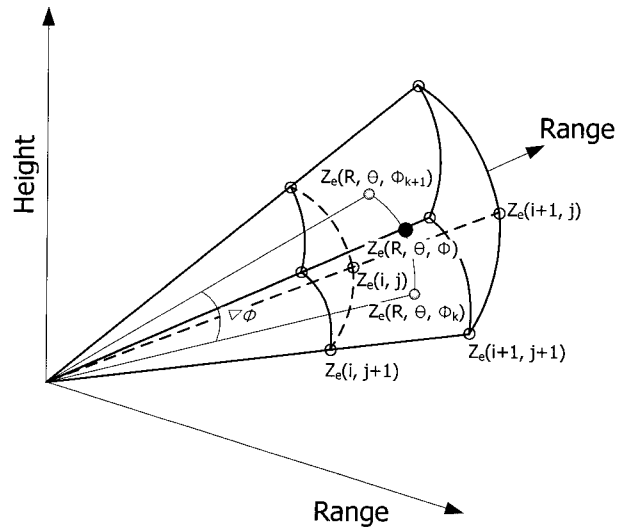
2. 레이더와 연계한 유역 홍수량 산정

2.1 레이더자료 품질검사 및 합성 CAPPI 산출

본 연구에서는 레이더 원시자료를 이용한 합성 CAPPI 산출의 전처리과정으로 레이더 자료에 대한 품질검사(QC)를 실시하였다. 품질검사는 레이더 자료를 이용한 정확한 강우의 추정 및 예측을 위해선 반드시 필요하다. 품질검사는 지형에코, 점에코, 파랑에코, 라인에코 등의 항목에 대해서 실시하였다.



(a) The location radar and observation range



(b) Data interpolation about azimuth and altitude angle

Fig. 1. Radar current situation and data interpolation

$$Z_e(R, \theta) = \frac{1}{\Delta R \Delta \theta} \{ (R - R_i) [(\theta - \theta_j) Z_e(i+1, j+1) - (\theta - \theta_{j+1}) Z_e(i+1, j)] - (R - R_{i+1}) [(\theta - \theta_j) Z_e(i, j+1) - (\theta - \theta_{j+1}) Z_e(i, j)] \} \quad (1)$$

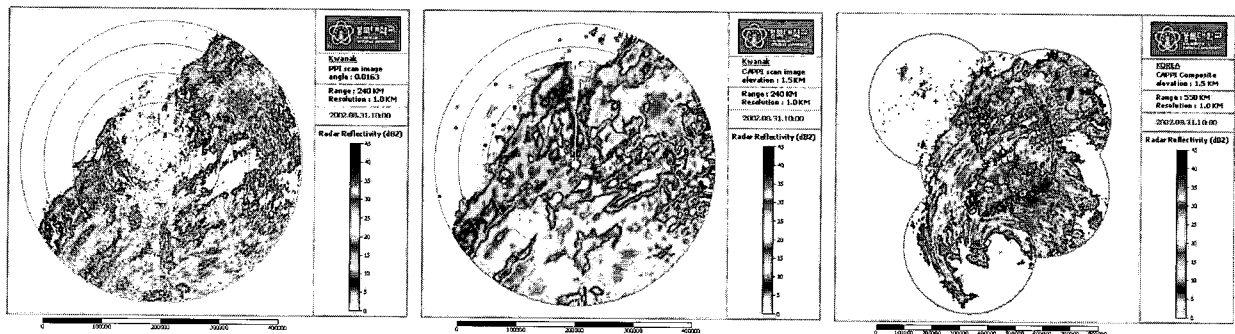
$$Z_e(R, \theta, \phi) = \frac{1}{\Delta \phi} [(\phi - \phi_k) Z_e(R, \theta, \phi_{k+1}) - (\phi - \phi_{k+1}) Z_e(R, \theta, \phi_k)] \quad (2)$$

기상청 C-band 레이더 6대의 원시자료에 대한 품질 검사를 수행한 후, 생성된 PPI를 이용하여 CAPPI를 산출하였다. Fig. 1은 합성 CAPPI 산출을 위해서 이용된 6지점(관악산, 제주, 부산, 동해, 군산, 백령도)의 레이더에 대한 현황과 자료의 보간에 대한 내용을 담고 있다. Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 Eq. (1), (2)를 이용하여 각각 방위각 및 고도각에 대한 보간을 통해서 CAPPI 자료를 산정하였다.

여기서, R = 레이더 위치로부터 격자점까지의 거리, θ = 레이더 위치로부터 격자점까지의 방위각, ϕ = 레이더 위치로부터 격자점까지의 고도각, ΔR = 방위각

에서의 해당 격자점 인근 반사도값 사이의 거리, $\Delta \theta$ = 방위각 θ_j 와 θ_{j+1} 사이의 각도, $\Delta \phi$ = 고도각 ϕ_k 와 ϕ_{k+1} 사이의 각도를 나타내고 있다.

Fig. 2는 태풍 루사시 2002년 8월 31일 10시에 대한 합성 CAPPI 산출 결과를 보여주고 있는데, Fig. 2에서 (a)는 6지점의 레이더 중 관악산 레이더에 대한 첫 번째 고도각 PPI 산출결과를 보여주고 있으며, (b)는 관악산 레이더의 고도 1.5 km에 대한 CAPPI를 나타내고 있고, (c)는 6지점의 CAPPI를 합성한 고도 1.5 km에서의 합성 CAPPI 영상을 나타내고 있다.



(a) KWK PPI(altitude angle 0.0163)

(b) KWK CAPPI(altitude 1.5 km)

(c) CAPPI composite(altitude 1.5 km)

Fig. 2. CAPPI composite computation results(2002.8.31.10:00)

2.2 Cokriging을 이용한 2차원 정량강우량 산정

본 연구에서는 레이더 관측자료와 지상의 강우관측소 강우량 자료의 지형통계학적인 분석작업을 통한 cokriging 기법에 의해서 개선된 강우량 자료를 산정하였다. 개선된 강우량 자료는 Eq. (3)과 같은 강우량 자료와 레이더 반사도 자료에 대한 선형모형을 이용하여 계산할 수 있다. Eq. (3)에서의 개선된 강우량을 추정하기 위해서는 분산을 최소로 하는 가중계수 λ_{G_i} , λ_{R_i} 을 결정하여야 하는데, 이에 대한 계산과정에서 필요한 강우량 자료 및 레이더 자료에 대한 공분산 및 상호공분산의 계산은 각 자료들에 대한 실험적 베리오그램을 바탕으로 이론적 베리오그램을 결정하는 지형통계학적 분석작업을 통해서 가능하였다.

$$V^*(u_0) = \sum_{i=1}^{N_G} \lambda_{G_i} G_i(u_i) + \sum_{i=1}^{N_R} \lambda_{R_i} R_i(u_i) \quad (3)$$

여기서, N_G = 전체 계산영역의 격자수(N)보다 작은 값으로서 지점 u_0 의 인근에 위치한 강우측정지점의 수, N_R = 지점 u_0 를 둘러싸고 있는 레이더 격자의 수, λ_{G_i} , λ_{R_i} = 강우량 추정에 이용되는 가중계수를 나타내고 있다.

본 연구에서는 태풍 루사시 8월 31일 01:00~9월 1일 06:00 기간동안의 감천 유역에서의 범람홍수모형의 적용을 위해서 루사로 인한 강우량을 지상 강우관측소의 강우량 자료와 레이더의 반사도 자료를 연계하여 개선된 2차원 강우량을 산정하였다. Fig. 3(a)는 우리나라 전 영역에 대한 강우량 산정 대상유역의 위치를 나타내

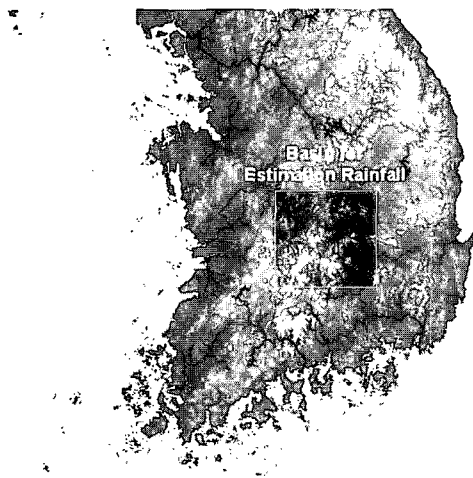
고 있으며, Fig. 3(b)는 홍수량 산정 유역에 대한 강우량 산정 유역의 비교 그림을 나타내고 있다. 대상유역 내에서 운영되고 있는 강우관측소는 기상청 21개 지점, 건설교통부 16개 지점, 한국수자원공사 15개 지점의 자료가 가용하였으며, 최종적으로 이들 52개 지점의 강우량 자료와 레이더 반사도 자료를 이용하여 정량강우량을 산정하였다.

Fig. 4(a)는 대상유역에 위치한 강우관측소를 이용한 Thiessen 망을 나타내고 있으며, Fig. 4(b)는 8월 31일 10:00에 대한 레이더 반사도 자료를 나타내고 있다. Fig. 4(c)는 cokriging을 이용한 정량강우량 산정 결과인데 강우량 자료와 레이더 자료 모두를 이용하여 추정된 강우량은 지점에 대한 점강우량과 공간적인 분포 및 경계에 있어서 개선된 결과를 나타내고 있음을 Fig. 4를 통해서 확인할 수 있다.

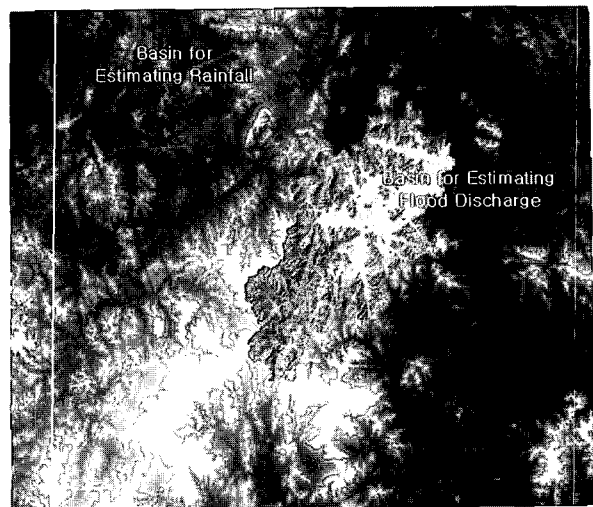
2.3 유역에서의 홍수량 산정

산정한 개선된 강우량 자료를 이용하여 감천유역에서의 홍수량을 Clark 방법과 Muskingum 방법에 의하여 계산하였다. 홍수량 산정을 위해서 주요지천별로 전체 유역을 10개의 소유역으로 구분하여 모의를 수행하였는데, Fig. 5는 10개의 소유역 구분과 각 소유역의 주요 수문학적 제원들을 나타내고 있다.

홍수량 산정을 위해서 먼저 계산된 전체 강우량 분석유역에 대한 강우량 자료를 홍수량 산정을 위한 각 소유역에 대한 강우량 자료로 변환하였다. 레이더와 연계한 개선된 강우량 값은 각 격자마다 할당되어 있으므로 소유역에 대한 면적평균 강우량은 소유역에 포함된 격자의 강우량을 합산한 후 격자의 개수로 나눔으로서



(a) The target watershed for rainfall estimation



(b) The target watershed for flood discharge estimation

Fig. 3. Topography of the target watershed

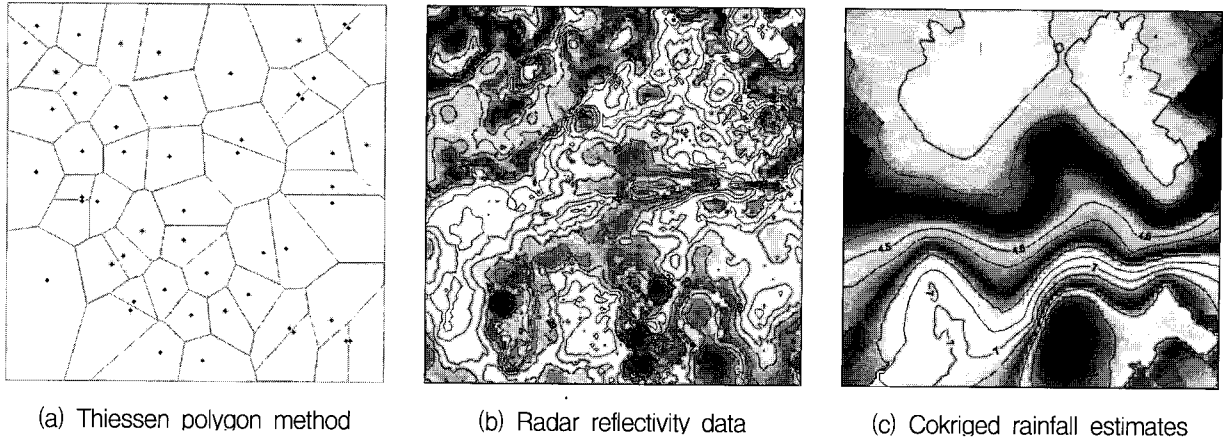


Fig. 4. Quantitative rainfall estimation results(2002.8.31.10:00)

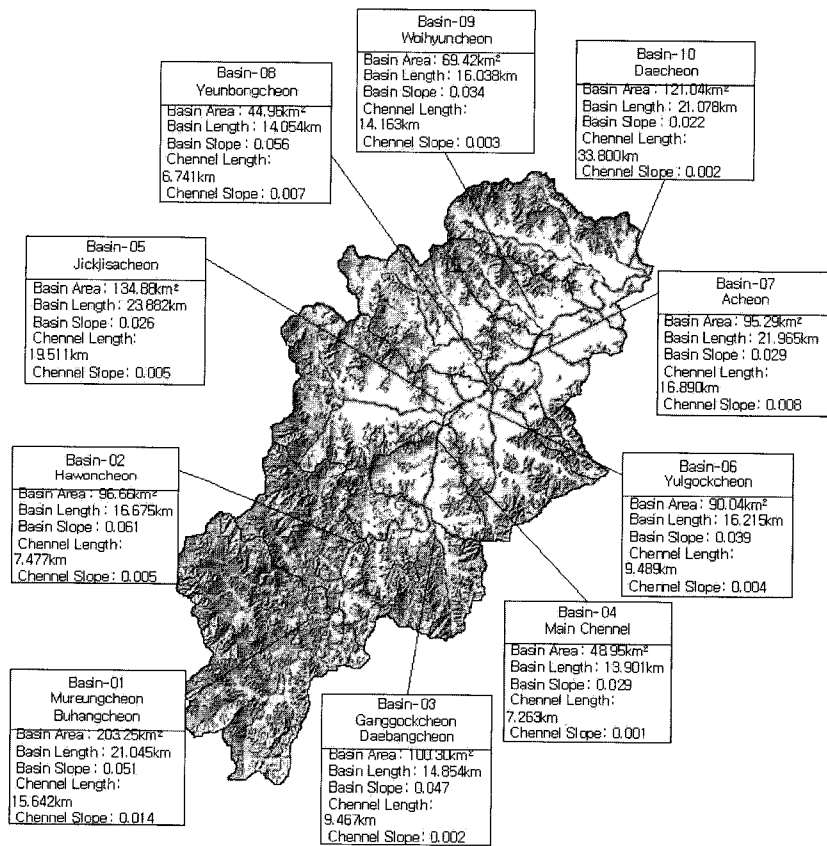


Fig. 5. Topography and watershed characteristics of the Gamcheon basin

평균강우량을 계산할 수 있었다. Fig. 6은 이러한 소유역별 평균 강우량 산출 및 홍수량 산정에 대한 계산 흐름도를 보여주고 있으며, Fig. 7은 산정된 소유역별 평균강우량을 나타내고 있다.

소유역별로 산출된 평균강우량 자료를 이용하여 유역에서의 홍수량을 계산하기 위해서 Clark 방법에 의한 유역추적과 Muskingum 방법에 의한 하도추적을 실시하였다. 먼저 각 소유역에 대한 유역 및 하도추적을 위

해서 Clark의 매개변수 T_c (도달시간)와 R (저류상수) 및 Muskingum의 매개변수 K (저류상수)의 값을 산정하였다. 도달시간 T_c 와 저류상수 R 의 값은 계산된 많은 값들 가운데 Kirpich 식으로 산정한 T_c 와 $R/(T_c + R) = 0.7$ 의 관계식을 이용해서 계산된 R 을 채택하였으며, K 의 값은 Kirpich 식의 경험공식을 토대로 산정한 값을 이용하여 추적구간에서의 홍수파의 전파속도를 이용하여 산정하였다.

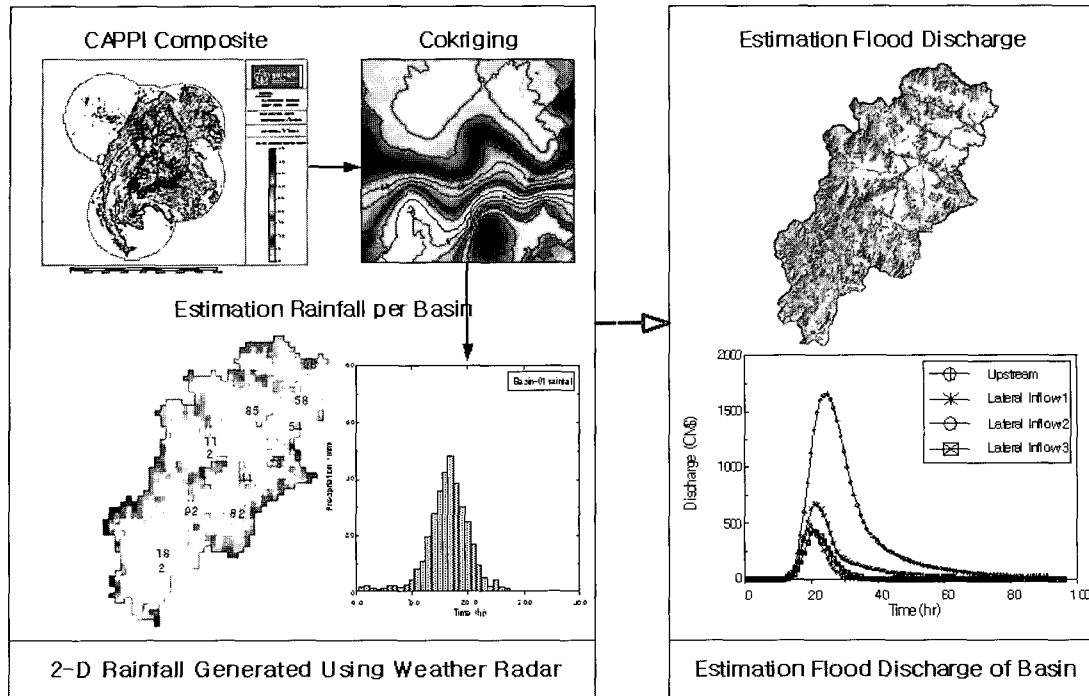


Fig. 6. Schematic diagram describing the procedures of spatial rainfall estimation and flood analysis by the developed model

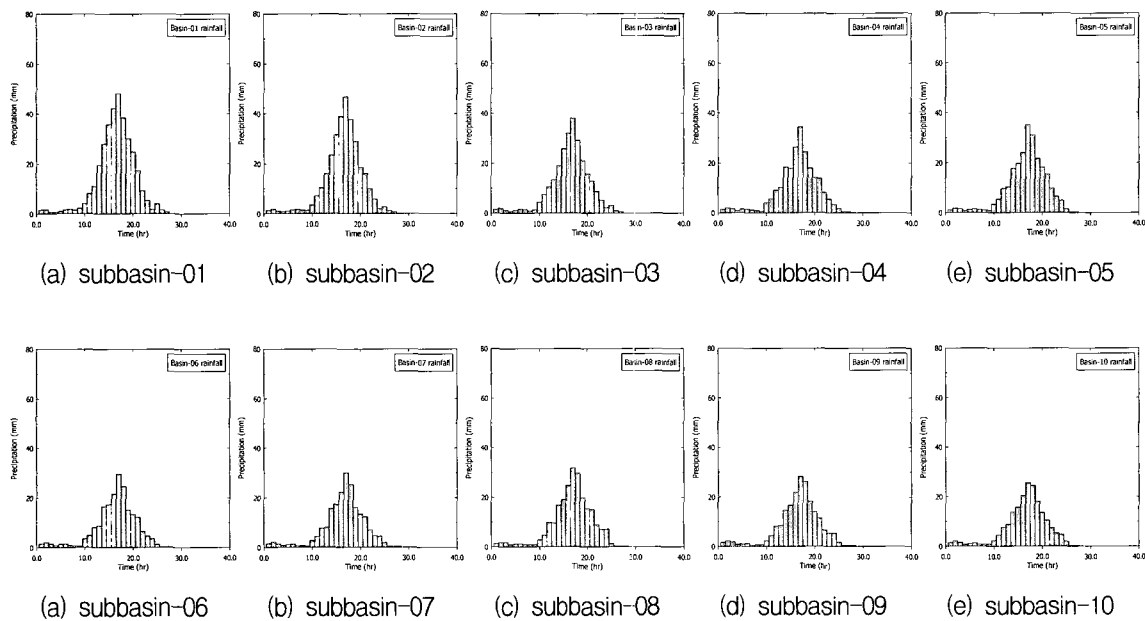


Fig. 7. The averaged rainfall estimation results for subbasin

이는 1998년과 1999년 홍수사상에 대해서 예비 유출 모의를 수행한 결과 이들 세 값으로 산정된 홍수량이 실측치와 잘 일치하는 결과를 얻었기 때문이다. Table 1은 Clark 방법 및 Muskingum 방법의 매개변수들을 다양한 방법들에 의해서 산정한 결과를 보여주고 있는데, 저류상수 K 의 계산에서 “a”는 Kirpich, Kerby 및

Kraven의 경험공식을 토대로 산정된 값을 의미하고, “b”는 각 경험공식에 대한 추적구간의 홍수파의 전파속도를 이용하여 산정된 값을 의미한다.

유역의 홍수량 산정결과는 하천에 대한 부정류 모의에 있어 경계조건 및 측방유입량으로 고려가 되었다. 하천에서의 부정류 모의에 있어서 상류단 경계지점을

Table 1. The parameter estimation results using Clark and Muskingum method

parameter		sub basin 01	sub basin 02	sub basin 03	sub basin 04	sub basin 05	sub basin 06	sub basin 07	sub basin 08	sub basin 09	sub basin 10
T_c	Kirpich	2.176	1.698	1.717	1.965	3.109	1.974	2.795	1.538	2.064	3.012
	Kerby	2.862	2.462	2.479	2.691	3.554	2.698	3.332	2.319	2.772	3.486
	Kraven	0.721	0.521	0.531	0.637	1.158	0.638	1.007	0.459	0.677	1.114
	Rziha	1.742	1.240	1.291	1.615	2.962	1.577	2.551	1.100	1.693	2.890
R	Sabol	26.571	13.276	13.724	11.422	34.402	15.582	25.182	7.964	14.494	31.269
	SCS	41.935	30.382	30.832	36.733	66.649	36.949	58.042	26.725	39.140	63.949
	Linsley	0.060	0.046	0.047	0.057	0.093	0.056	0.083	0.042	0.059	0.092
	Clark	1.712	1.403	1.353	1.758	2.844	1.636	2.735	1.426	1.812	2.638
	T_c -R(0.3)	0.933	0.728	0.736	0.842	1.333	0.846	0.198	0.659	0.884	1.291
	T_c -R(0.5)	2.176	1.698	1.717	1.965	3.109	1.974	2.795	1.538	2.064	3.012
	T_c -R(0.7)	5.078	3.962	4.007	4.586	7.255	4.606	6.522	3.589	4.815	7.027
K	Kirpich-a	2.841	2.329	4.017	3.829	5.020	3.082	3.785	1.904	4.904	12.183
	Kerby-a	2.014	1.785	2.485	2.414	2.845	2.116	2.697	1.580	2.805	4.871
	Kraven-a	1.039	0.814	1.677	1.585	2.211	1.176	1.522	0.624	2.163	7.120
	Kirpich-b	1.894	1.552	2.678	2.553	3.347	2.055	2.524	1.270	3.269	8.122
	Kerby-b	1.343	1.190	1.657	1.609	1.897	1.411	1.598	1.054	1.870	3.247
	Kraven-b	0.963	0.543	1.118	1.057	1.474	0.784	1.015	0.416	1.442	4.746

김천수위표 지점으로 선정하였으므로 홍수량 산정은 소유역 1, 2, 3 및 4를 하나의 유역으로 고려하여 계산을 수행하였다. 그 외의 다른 소유역들에 대해서는 부정류 모의에서 각각의 소유역들이 주요 지천들을 하나씩 포함하도록 유역을 구분하였으므로 개별적으로 홍수량을

산정하였다. Fig. 8은 각 소유역에 대한 홍수량 산정결과를 보여주고 있으며, Table 2는 이러한 홍수량 산정결과에 대한 소유역별 지천명과 하천 부정류 계산을 위한 관계를 나타내고 있다.

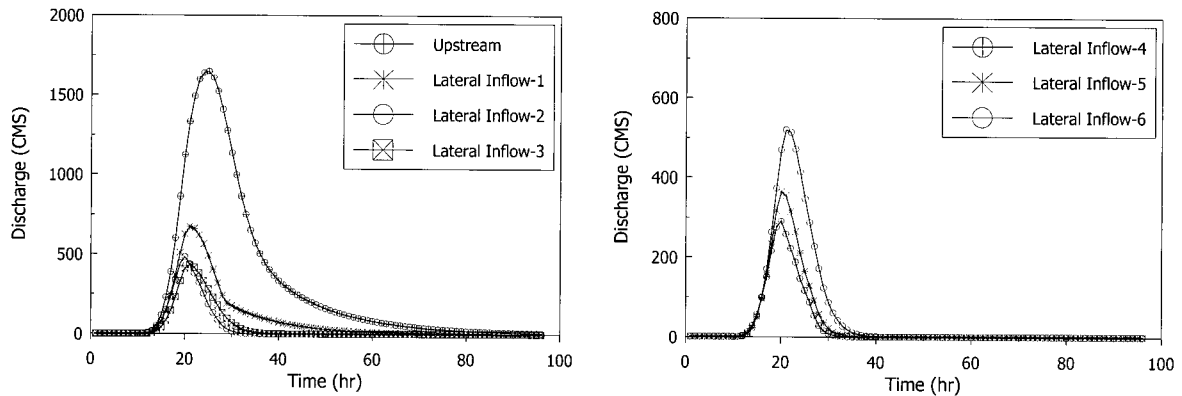


Fig. 8. The flood discharge estimation results for watershed

Table 2. The relationship between a tributary river name and flood discharges per subbasin

subbasin division	unsteady computation	tributary river
Basin-01, 02, 03, 04	upstream boundary condition	Mureungcheon, Buhangcheon, Hawoncheon, Ganggokcheon, Daebangcheon
Basin-05	lateral inflow 1	Jickjisacheon
Basin-06	lateral inflow 2	Yulgokcheon
Basin-07	lateral inflow 3	Acheon
Basin-08	lateral inflow 4	Younbongcheon
Basin-09	lateral inflow 5	Woihyuncheon
Basin-10	lateral inflow 6	Daechon

3. 2차원 홍수범람모형

3.1 홍수범람모형의 개발

본 연구에서는 레이더와 연계 해석한 구역에서의 홍수량 자료를 이용하여 하천에서의 제방붕괴로 인한 범람해석을 실시하였다. 제방의 월류 발생여부를 판단하여 만일에 발생할 수 있는 제방 지점에서의 붕괴로 인한 범람홍수량을 구하기 위한 2차원 홍수범람모형을 개발하였는데, 제방붕괴로 인한 제내지에서의 다양한 지형조건을 고려할 수 있기 위해서 Eq. (1)~(3)의 2차원 천수방정식을 비정형 격자망에 대해서 수식을 유도하였고, Eq. (4)는 이러한 2차원 홍수범람 수치모형의 일반식을 나타내고 있다.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{A_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{A_y} \right) + g A_x \left[S_{fx} + \frac{\partial H}{\partial x} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{A_y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_y Q_x}{A_x} \right) + g A_y \left[S_{fy} + \frac{\partial H}{\partial y} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial i} \left\{ K_i \frac{\partial H}{\partial i} \right\} = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{\frac{\varphi}{n_i} h_i R_i^{2/3}}{\left| \frac{\partial H}{\partial i} \right|^{1/2}} \quad (5)$$

여기서 $Q_x, Q_y = x, y$ 방향에 대한 유량, $q_x, q_y = x, y$ 방향에 대한 단위폭당 유량, $A_x, A_y = x, y$ 방향에 대한 단면적, $S_{fx}, S_{fy} = x, y$ 방향에 대한 마찰경사, $x, y, t =$ 시·공간 좌표, $g =$ 중력가속도, $h =$ 수심, $H =$ 수위를 나타낸다.

모형은 제내지의 다양한 지형조건을 고려할 수 있기 위해서 Fig. 9와 같은 비정형 격자망에 대한 계산을 수행할 수 있도록 구성하였는데, 여기서 $c, 1, 2, 3, 4 =$ 계산요소 및 계산요소와 인접한 요소번호, $G_i =$ 각 요소의 무게중심점의 좌표, $a_i =$ 각 요소의 평면적, $n_i =$ 계산요소를 구성하는 격자점 좌표, $L_{ij} = i$ 요소의 중심에서 인접 j 요소의 경계면 사이의 거리, $SL_i =$ 인접 i 요소와의 경계면의 폭의 길이(δ_i)를 의미한다.

Fig. 10은 계산요소의 구성을 나타내고 있는데, 계산 요소에 대한 방향성(θ_i)과 면적(a_i)은 Eq. (6) 및 (7)로 계산되는데, 여기서, $x_k = k$ 번째 절점의 x 좌표, $y_k = k$ 번째 절점의 y 좌표, $x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1, n = 4$ (사각형 요소) 또는 3 (삼각형 요소)를 의미한다.

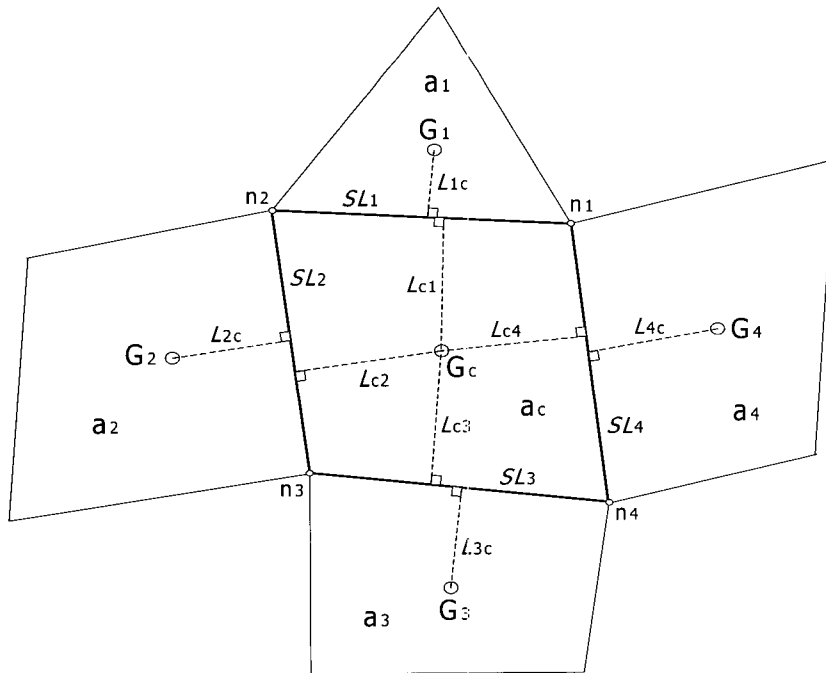


Fig. 9. The mesh formation for flood inundation model

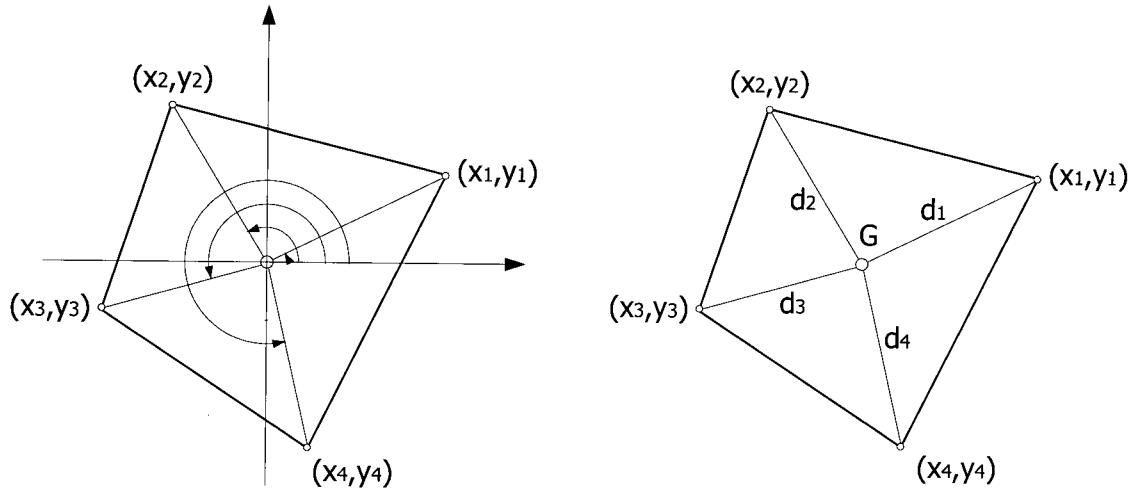


Fig. 10. Schematic of areal and directional components of unstructured element

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{y_k}{x_k} \right) \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \det \begin{vmatrix} x_k & x_{k+1} \\ y_k & y_{k+1} \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

또한 계산요소의 도심(G)의 표고(z_G)를 결정하기 위해서 Eq. (8)과 같은 계산요소 격자점들의 표고에 대한 거리 가중평균값을 이용하였다.

$$z_G = \frac{\sum_{r=1}^n d_r z_r}{\sum_{r=1}^n z_r} \quad (8)$$

여기서, z_r = 해당 계산요소 격자점의 표고, $d_r = \sqrt{(x_r - x_G)^2 + (y_r - y_G)^2}$ 로서 도심과 계산요소 격자점 간의 거리를 나타내고 있다.

3.2 모형의 검증

본 수치모의의 목적은 개발된 모형이 2차원 흐름양상에서 마른 하도를 따르는 홍수파의 전파양상의 모의가 원활히 이루어지는지를 시험하기 위한 것이다. 본 시험사례에 대한 정확해는 없으나, Fennema and Chaudhry(1989, 1990), Alcrudo and Garcia-Navarro (1993), Zhao et al.(1994, 1996) 등의 문헌에서 수치결과와 비교가 가능하다.

수치실험을 위한 계산 영역과 요소망 구성도는 Fig. 11에 나타나 있는데, 그림에서 확인할 수 있듯이 요소

망은 축소부와 급확대부에서 정밀한 계산을 위해서 더 많은 요소로 세분화하였다. 전체 계산요소 및 절점의 수는 2315개 및 2422개로 구성되어있다. 좌·우 비대칭의 결곡부는 75 m로 가정하였으며, 하상에서의 마찰의 영향으로 Manning의 조도계수 0.05를 적용하였다. 모의를 위한 상류단 경계조건으로는 이전의 연구자들의 실험조건과 입력값을 일치시키기 위해서 초기수위가 5 m인 댐에서의 붕괴유량의 값을 웨어식을 이용하여 1425 CMS를 입력하였다. 이때의 유량계수는 1.7을 사용하였으며, 경계조건으로는 반사경계조건으로 가정하였다.

Fig. 12는 본 연구에서 개발된 범람모형의 모의결과로서 모의시작 후 3초, 6초, 9초, 그리고 12초 때의 유속 분포도 및 등수심도를 나타내고 있다. Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 앞서 언급된 여러 연구자들의 계산결과와 본 수치실험이 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 13은 Fig. 11에 표시된 주요 지점에 대한 범람수심의 변화양상을 나타내고 있다.

4. 실제유역에 대한 모형의 적용

4.1 태풍 루사로 인한 감천유역 범람모의

Fig. 14는 하천 부정류 계산을 위한 유역에서의 하도망 구성도를 나타내고 있는데, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 본류인 낙동강으로 감천이 유입되고 있으며, 본류부의 상류단 및 하류단 경계조건으로는 낙동 수위표의 유량 수문곡선 및 왜관 수위표의 수위 수문곡선이 이용되었다. 지류인 감천의 모의에서는 상류단 경계조건으로 소유역 1, 2, 3 및 4의 홍수량 산정 결과가 이용되었으며, 측방 유입량으로 각 지류를 대표하는 5, 6, 7, 8, 9 및 10 소유역에서 산정된 유출수문곡선이 이용되었다.

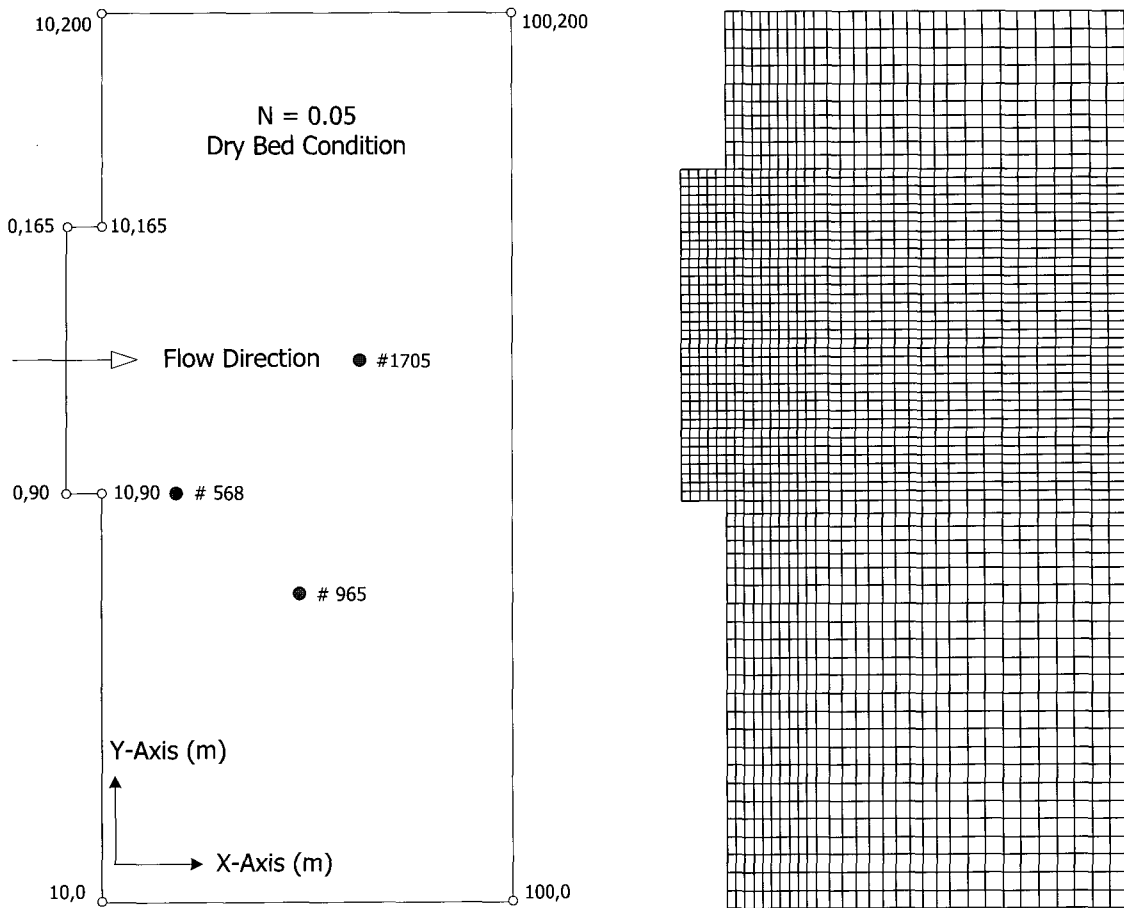


Fig. 11. Schematic of numerical experiments for 2-dimensional dam and levee failure

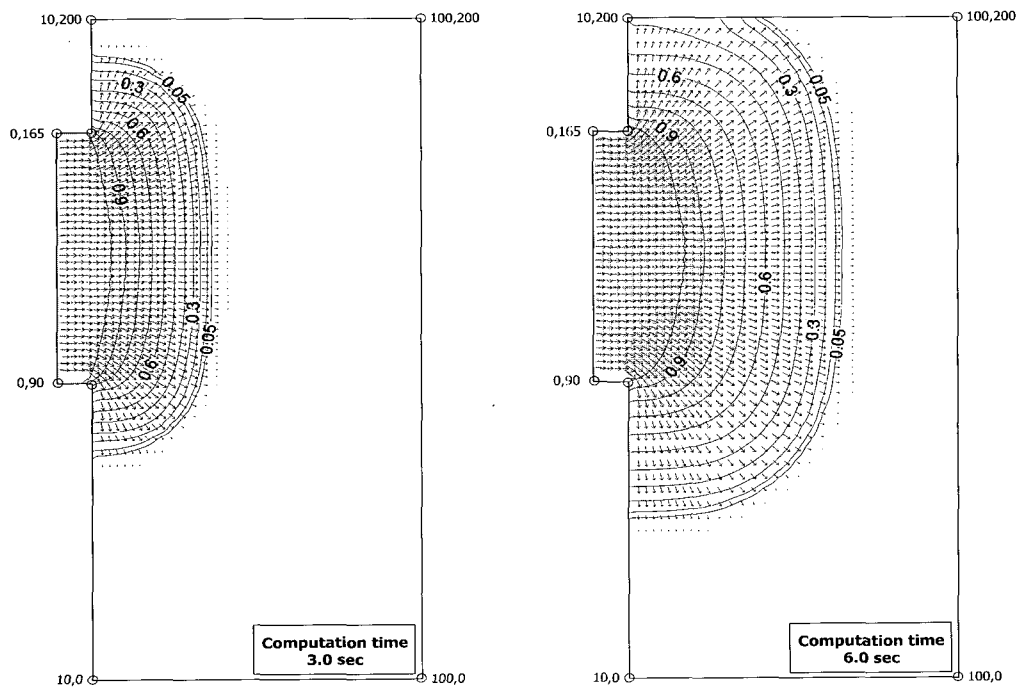


Fig. 12. Velocity and depth distribution results (continued)

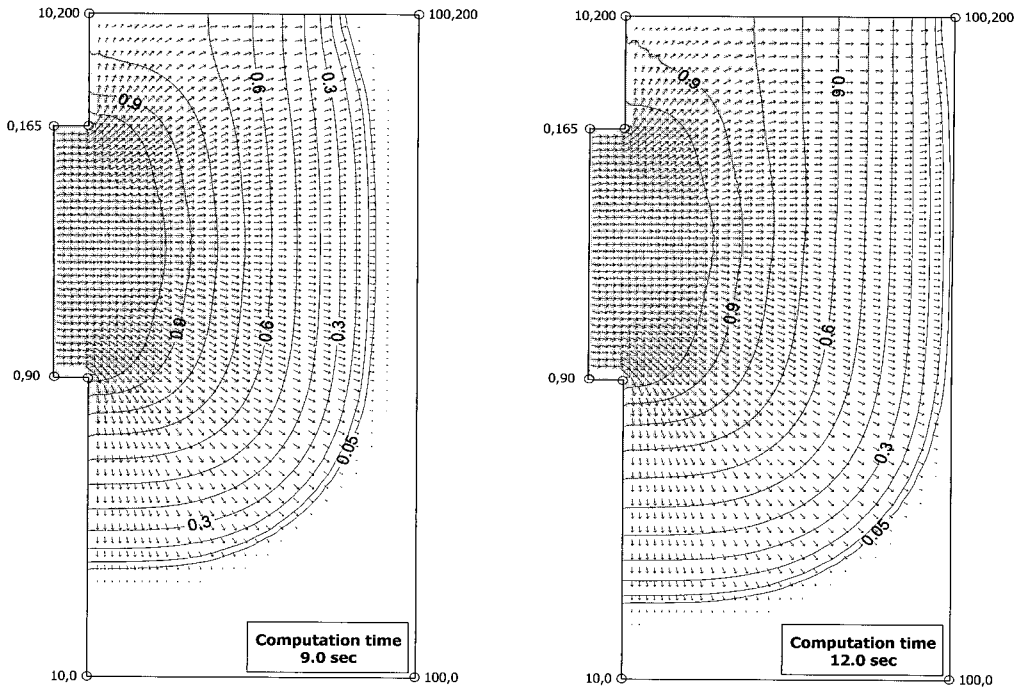
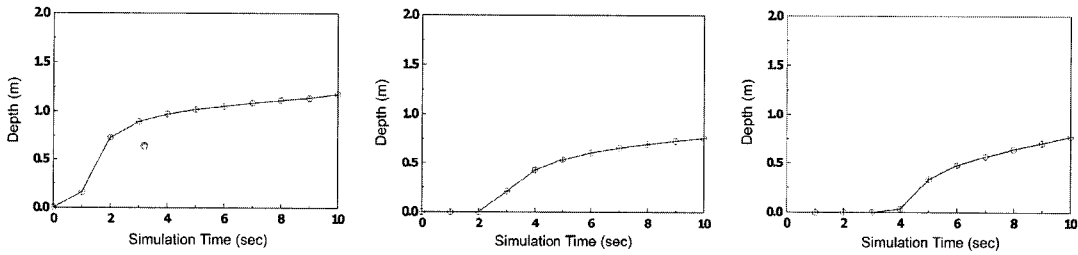


Fig. 12. Velocity and depth distribution results



(a) element #596

(b) element #965

(c) element #1705

Fig. 13. The calculated stages at main positions

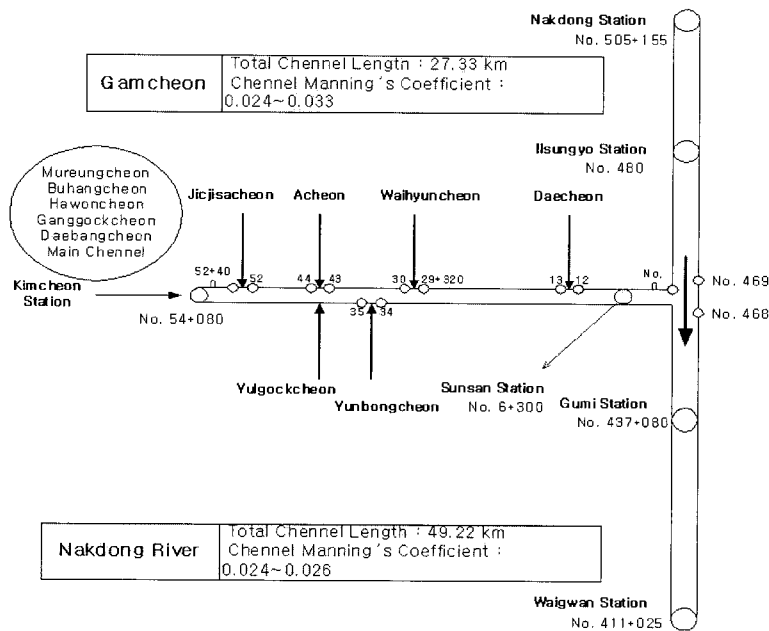


Fig. 14. Schematic diagram describing characteristics of channel networks in Gamcheon river system

Fig. 15는 범람모의 구간에서 태풍 루사로 인해 제방이 붕괴된 지점을 나타내고 있는데, 붕괴는 모두 6지점에서 발생하였다(경상북도, 2003; 김천시, 2003; 행정자치부 국립방재연구소, 2003). Fig. 16은 본류부인 낙동강에서의 상·하류단 경계조건으로 입력된 낙동수위표 지점에서의 유량수문곡선 및 왜관수위표 지점에서의 수위수문곡선을 나타내고 있다.

하천 구간에서의 수위 증가로 인해 제방의 월류 및 붕괴가 발생되며, 이로 인한 제방 붕괴류는 제내지에서의 2차원 범람홍수류 모의를 위한 상류단 경계조건으로 처리되어 수치모의를 실시하였다. 그림 17은 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람양상을 모의하기 위한 2차원 요소망 구성도를 나타내고 있다. 하천을 경계로 위쪽

요소망(Mesh 1)은 11,277개의 요소와 5,891개의 노드로 구성되어 있으며, 아래쪽 요소망(Mesh 2)은 10,822개의 요소와 5,652개의 노드로 구성되어 있다. 그림 15, 16에서 확인할 수 있듯이 제방 #2, #3 및 #6 지점의 붕괴로 인한 범람홍수류는 Mesh 1으로 유입되며, 제방 #1, #4 및 #5 지점의 붕괴로 인한 범람홍수류는 Mesh 2로 유입되어 각각의 2차원 범람모의에 있어서 경계조건으로 처리가 된다.

Fig. 18은 감천 유역에서의 하천 제방붕괴로 인한 2차원 홍수범람해석의 결과로서 모의시작 후 2.0 시간 및 4.0 시간에서의 범람수심도 및 유속분포도를 나타내고 있다.

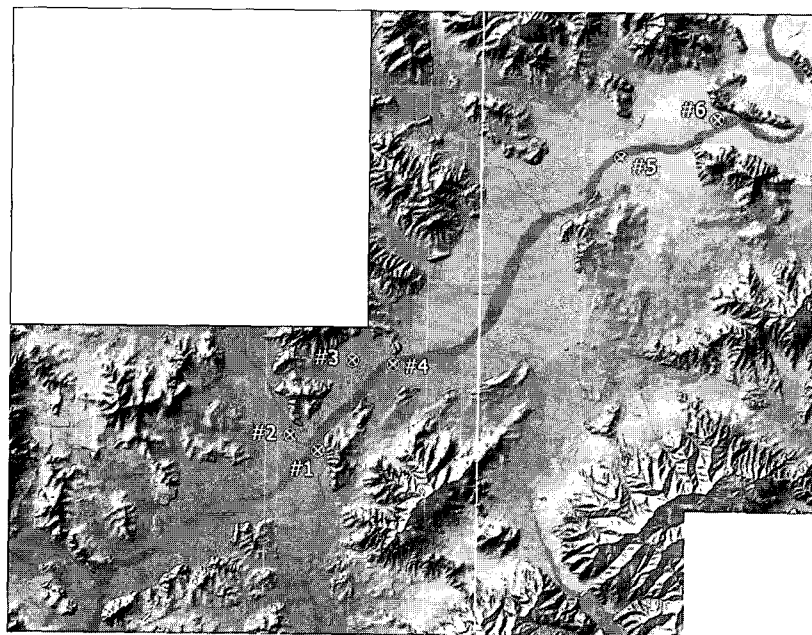


Fig. 15. The site of levee failure

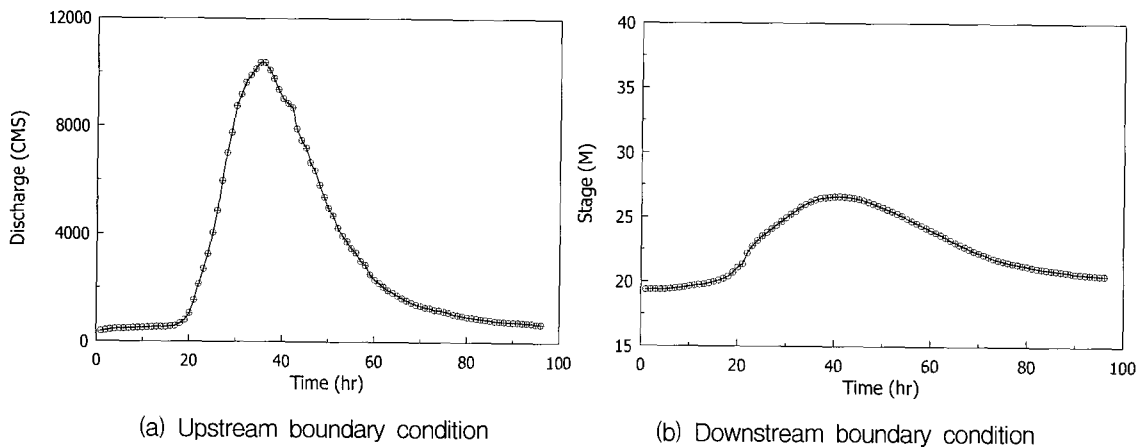


Fig. 16. Boundary condition

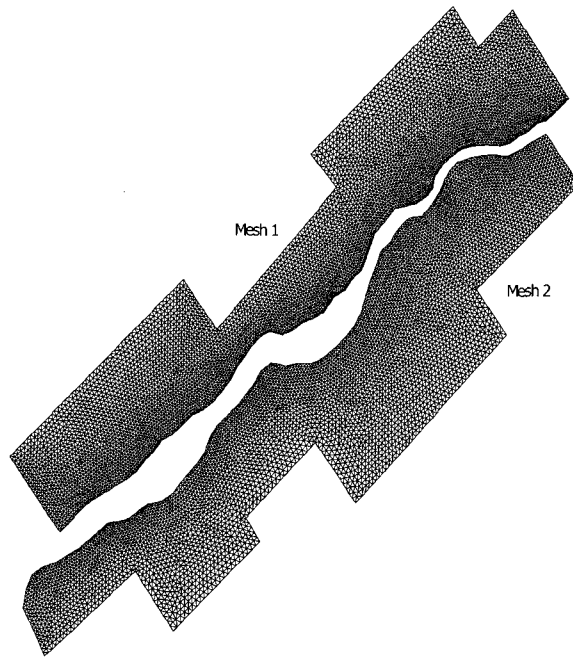


Fig. 17. The protected lowland mesh generation for 2-dimensional inundation simulation

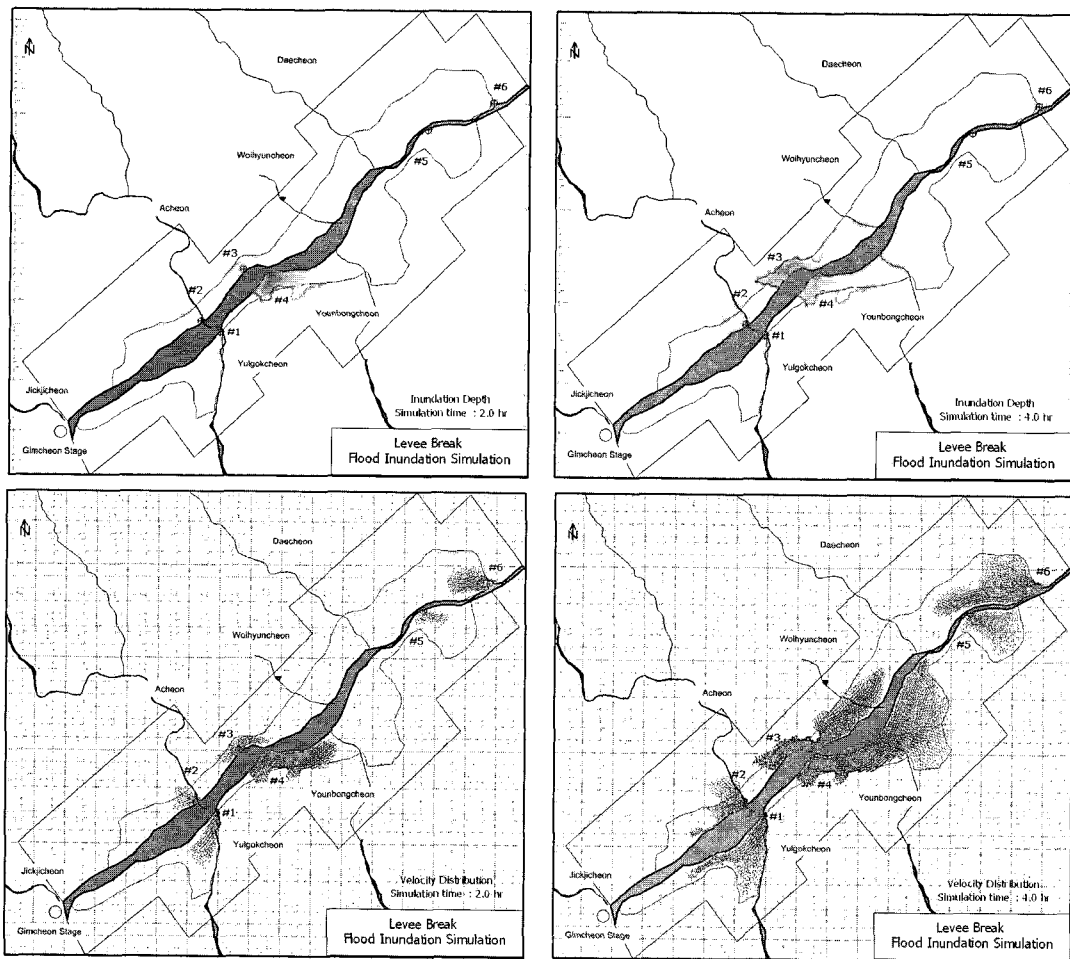


Fig. 18. Inundation simulation results

4.2 비교검토

감천유역에 대한 부정류 모의에 있어 지류인 감천의 상류단 경계조건으로 처리된 김천 수위관측소는 '85년에 유량측정을 실시하여 수위-유량관계곡선식을 유도하였으나 유량측정 당시인 '85년 5월 수위표의 영점을 조정하여 기존의 수위-유량관계곡선식을 이용한 김천 수위표에서의 홍수량 검증에는 신뢰성이 미약하다(경상북도, 2003). 또한 선산 수위관측소는 낙동강 본류로부터 3.3 km 상류에 위치해 있으며 낙동강 본류와의 상대 수위 높낮이에 따라 이상수위가 관측되고 김천 수위관측소의 수위기록과 일관성이 결여되는 등 수위기록의 신뢰도가 떨어지고 있다(경상북도, 2003). 이러한 사항들을 감안할 때, 유역에서의 홍수량 산정결과를 이들 수위표 지점에서의 유량값들과 비교하는 것은 모형의 검증 차원에서 무의미한 것으로 판단되었다. 따라서 감천유역의 2차원 범람모의에 대한 검증은 하도내의 주요 수위표 지점에서의 수위 수문곡선과의 비교를 통해서 수행되었다. 특히 선산 수위표 지점에서의 수위 수문곡선과의 비교는 제방 붕괴에 따른 범람과 낙동강 본류

및 지류인 감천 하도에서의 부정류 모의 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있는 지점으로 사료된다. 또한 제내지에서 계산된 범람면적을 기존의 홍수 범람흔적 자료(경상북도, 2003; 김천시, 2003; 행정자치부 국립방재연구소, 2003)와 비교함으로써 2차원 범람모형에 대한 검증을 수행하였다.

Fig. 19는 낙동강 본류부에 위치한 일선교 및 구미 수위표 지점과 감천 하류에 위치한 선산 지점에서의 실측 수위수문곡선과 모의된 수위수문곡선과의 비교를 나타내고 있다. Fig. 19를 통해서 보는 바와 같이 하천에서의 부정류 계산결과가 실측값과 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 20(a)는 제방 붕괴 후 최대 범람수심도를 나타내고 있는데, 그림에서 표시된 기 조사된 홍수흔적자료와 비교해 볼 때 본 2차원 제방 붕괴 범람모의가 상당히 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 20(b)는 ArcGIS와 연계한 3차원 홍수범람도를 나타내고 있으며, 범람모형의 모의결과를 GIS와 연계하여 결과를 제시함으로써 합리적인 방재대책을 수립할 수 있는 가시적인 범람홍수 관리시스템을 본 연구에서 구축하였다.

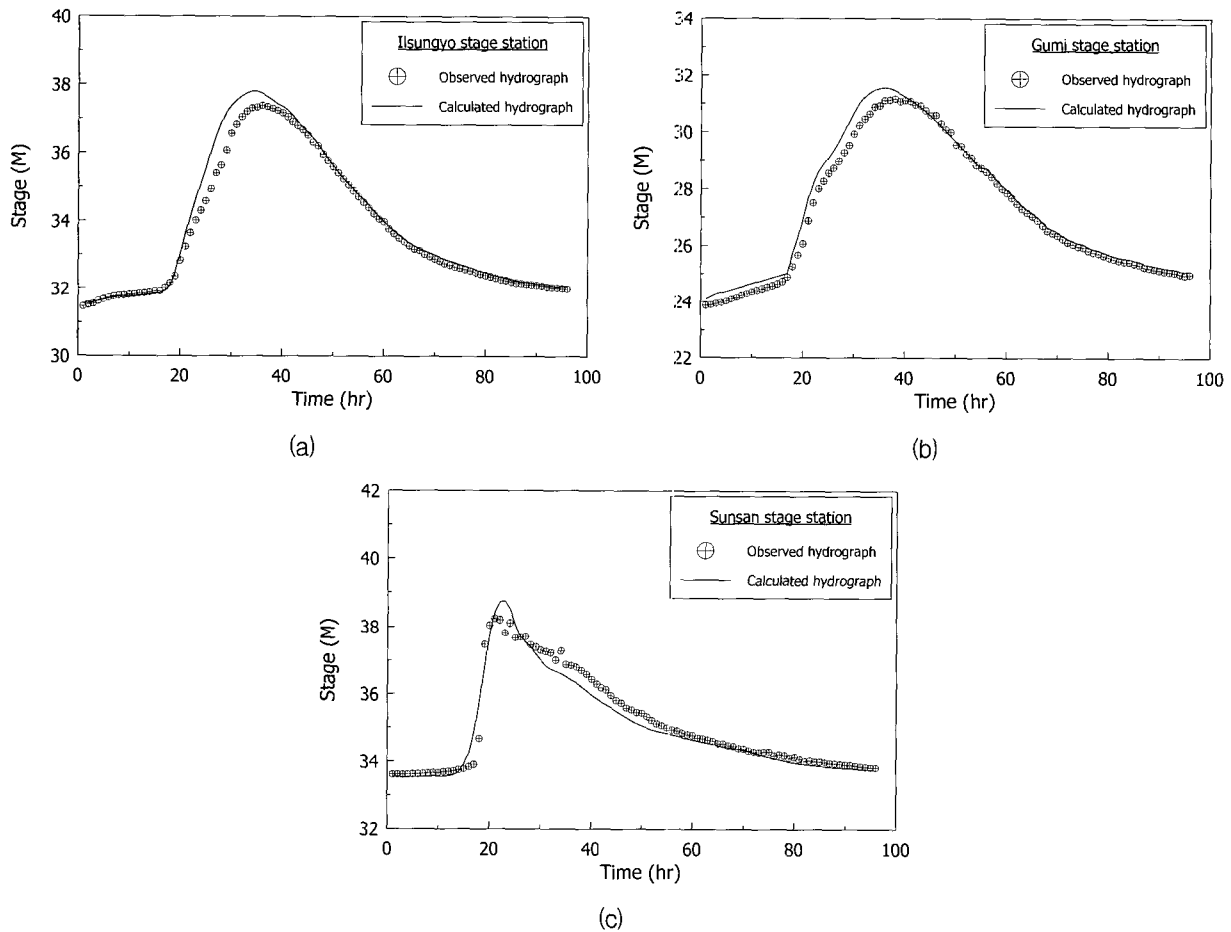


Fig. 19. Observed and calculated stages at (a) Ilsungyo, (b) Gumi, and (c) Sunsan

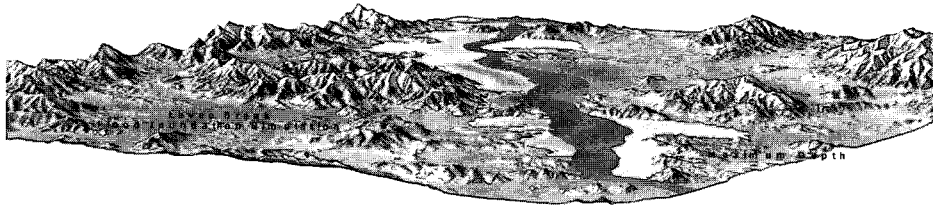
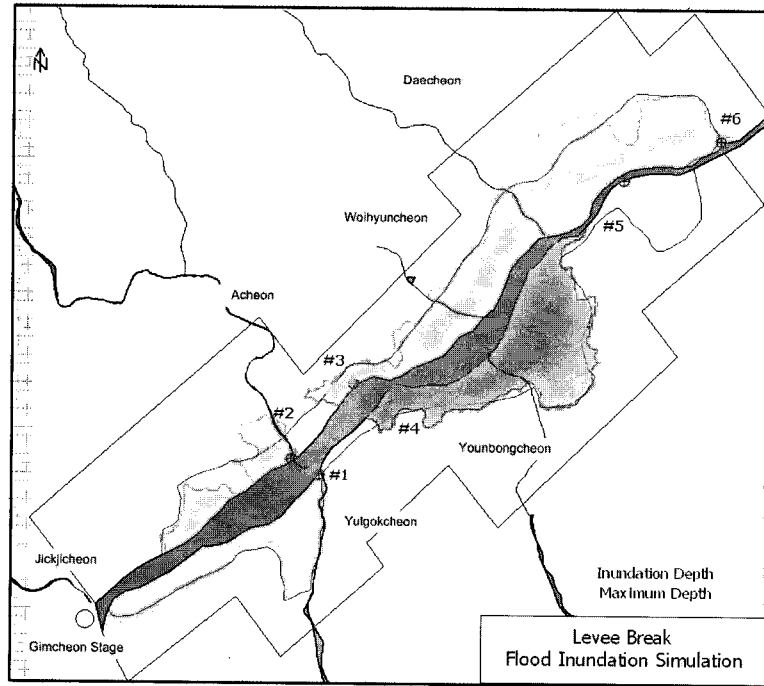


Fig. 20. Observed flooded area (solid line) and the simulated flooded area (shaded area)

4. 결 론

본 연구에서는 제방붕괴로 인한 제내지에서의 범람 홍수의 전파양상을 효율적으로 계산할 수 있는 2차원 범람홍수모형을 개발하였으며, 범람모의를 위한 기본 입력자료 구축을 위해서 레이더 자료와 연계하였고, 레이더 정량강우-홍수유출-범람해석에 대한 통합시스템을 구축하였다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같이 요약될 수 있겠다.

- (1) 범람해석을 위한 강우 기본자료 구축을 위해서 레이더와 연계하였다. 레이더의 반사도 측정자료와 강우관측소에서의 강우량 관측자료의 지형통계학적 분석을 실시하고, 이들 자료를 이용하여 최적의 강우량을 산정하기 위해서 cokriging 기법을 적용하였다.
- (2) 태풍 루사로 인한 감천 지역의 실제 제방붕괴에

다른 범람양상을 모의하였다. 레이더와 연계하여 산정된 2차원 정량 강우량 자료는 유역에서의 홍수량 산정을 위해 이용되었으며, 유역에서의 홍수량은 하도 및 제내지에서의 홍수범람모의를 위해 이용되었다. 모의결과는 실제 홍수흔적과 하천에서의 홍수위 자료 등과 비교하여 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있었다.

- (3) 본 연구를 통해서 도시홍수, 돌발홍수 등 국지성 강우에 대한 강우레이더 자료의 실질적인 활용이 가능하겠으며, 국내 홍수재해에서의 기상-강우-유출-범람에 관한 체계적인 실무 적용에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 국내의 홍수예정보체계와 연계하여 선행시간을 확보한 정확도 높은 홍수정보시스템 구축에 크게 기여할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁시행한 2004년도 특정연구개발사업중 웹기반 홍수 정보 시스템 Prototype 개발사업(과제번호 : MI-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 연구로서 관계당국에 감사 드립니다.

참고 문헌

- 경상북도 (2003). **감천 (지방2급) 하천정비기본계획**.
- 김종해, 한건연, 서규우 (2003). “하천 홍수범람모의를 위한 불확실도 해석기법의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제4호, pp. 661-671.
- 김천시 (2003). **2002 수해백서(태풍 루사, 매미)**.
- 이정규, 김태관 (2003). “댐붕괴 문제의 해석에 관한 TVD-McCormack 기법의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제3호, pp. 365-374.
- 이홍래, 한건연, 김상호, 최현상 (1998a). “하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(I): GIS와의 연계 해석.” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제4호, pp. 415-427.
- 이홍래, 한건연, 김상호 (1998b). “하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(II): 불확실 해석.” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제4호, pp. 429-437.
- 최규현, 한건연 (2005a). “댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: I. 이론 및 모형의 검증.” **대한토목학회논문집**, 제25권, 제2B호, pp. 135-142.
- 최규현, 한건연 (2005b). “댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: II. 적용 예.” **대한토목학회논문집**, 제25권, 제2B호, pp. 143-149.
- 행정자치부 국립방재연구소 (2003). **2002年 災害白書**.
- Alcrudo, F., and Garcia-Navarro, P.(1993). “A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations.” *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 16, pp. 489-505.
- Bradford, S.F., and Sanders, B.F. (2002). “Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 289-298.
- Brufau, P., and Garcia-Navarro, P. (2000). “Two-dimensional dam break flow simulation.” *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 33, pp. 35-57.
- Chen, C.L., and Armbruster, J.T. (1980). “Dam-break wave model: Formulation and verification.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 747-767.
- Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. (1989). “Implicit methods for two-dimensional unsteady free-surface flows.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 321-332.
- Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. (1990). “Explicit methods for 2-D transient free surface flows.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 8, pp. 1013-1034.
- Fread, D.L. (1988). *BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures*, NWS Reports, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Md.
- Garcia-Navarro, P., Hubbard, M.E., and Priestley, A. (1995). “Genuinely multidimensional upwinding for the 2D shallow water equations.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 121, pp. 79-93.
- Jha, A.K., Akiyama, J., and Ura, M. (2000). “Flux-difference splitting schemes for 2d flood flows.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 33-42.
- Petrascheck, A.W., and Sydler, P.A. (1984). “Routing of dam break flood.” *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 36, pp. 29-32.
- Ponce, V.M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Singh, V.P. (1996). *Dam Breach Modeling Technology*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Sleigh, P.A., Gaskell, P.H., Berzins, M., and Wright, N.G. (1998). “An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries.” *Computational Fluid Dynamics*, Vol. 27, No. 4, pp. 479-508.
- Zhao, D.H., Shen, H.W., Tabios, G.Q., Lai, J.S., and Tan, W.Y. (1994). “Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 863-883.
- Zhao, D.H., Shen, H.W., Lai, J.S., and Tabios, G.Q. (1996). “Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 692-701.

(논문번호:05-23/접수:2005.02.07/심사완료:2006.03.06)