

GIS 기반 농경지 침수모의시스템의 구축 및 적용 Applications of a GIS-based Paddy Inundation Simulation System

김 상 민* · 박 중 민** · 박 승 우***

Kim, Sang Min · Park, Chong Min · Park, Seung Woo

Abstract

A GIS-based paddy inundation simulation system which is capable of simulating temporal and spatial inundation processes was established and applied in this paper. The system is composed of HEC-GeoHMS, and HEC-GeoRAS modules which interface the GIS and flood runoff models, and HEC-HMS, and HEC-RAS models which estimate the flood runoff. It was used to simulate storm runoff and inundation for a small rural watershed, the Baran HP#7, which is 10.69 km² in size. The simulated peak runoff, time to peak, and total direct runoff for eight storms were compared with the observed data. The results showed that the coefficient of determination (R^2) for the observed peak runoff was 0.99 and an error, RMSE, 11.862 m³/s for calibration stages. In the model verification, R^2 was 0.99 and RMSE 1.296 m³/s. Paddy inundation for each paddy growing stages in study watershed were estimated using verified inundation simulation system when probability rainfall was applied.

Keywords : HEC-GeoRAS, HEC-RAS, GIS, inundation, paddy

I. 서 론

농업기반공사의 배수개선사업기본계획에 의하면 우리나라의 농경지 배수개선 대책은 주로 벼의 침수피해를 경감하기 위해 수립하고 있으며, 강우-유출해석에 의한 유출량 산정과 하천 및 농경지 침수

수리해석을 통해 벼의 침수 피해량을 추정하고 배수개선 대책에 따른 경제성 분석을 수행한다. 배수개선 대책을 수립하는 절차는 유역의 수문학적 특성을 조사하여 설계 강우량을 결정하고, 홍수량과 외수위를 분석하여 침수원인을 규명하며, 침수피해 예방을 위한 적절한 배수시설과 규모의 대안을 설정하고, 사업시행 전후 침수분석을 실시하여 대안별로 경제성을 분석하는 등의 일련의 과정을 거쳐 대책을 수립한다(Ministry of Agriculture and Forestry, 2001).⁸⁾

현재 우리나라 배수개선사업의 수문해석은 농업기반공사에서 개발한 배수개선홍수분석 시스템

* 서울대학교 농업생명과학연구원, 공학박사

** 농림부 농촌개발국 농촌용수과

*** 서울대학교 농업생명과학대학

* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4591

Fax: +82-2-873-8725

E-mail address: smkim97@plaza1.snu.ac.kr

(flood analysis system, FAS)을 이용하고 있다. FAS에서 유역에서의 홍수유출량 추정은 논과 일반 유역을 분리하여 추정하며, 각각 미국 농무성의 SCS 방법에 기초하고 있다. 하도구간에서의 홍수량의 추정은 각 소유역별로 하천으로 유입되는 유달시간을 계산하여 유역 유출량을 합성하는 방법과 Muskingum 방법을 이용한다(Ministry of Agriculture and Forestry, 1997).⁷⁾

최근 GIS의 발달과 수치지도의 제작으로 GIS 기반 수문모형의 개발과 적용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. GIS를 이용하여 유역경계를 추출하고 배수면적, 유로장, 경사, 유역 평균 CN, 도달 시간, 침투유량 및 침투시간과 같은 유역의 수문학적 특성과 지형특성을 추출하는 지형자료 전처리 모형이 개발되고 있다. 또한, 기존의 수문모형과 지형자료 전처리 모형이 연계하여 운영될 수 있도록 수문모형이 GIS 기반의 지형자료 전처리 모형과 통합되어 개발되고 있다. SHE, TOPMODEL, HEC-HMS, HEC-RAS, HSPF, SWAT과 같은 기존의 수문, 수질 모형이 GIS와 연계 운영될 수 있도록 수정하여 개발되었으며, 이런 추세는 당분간 지속될 것으로 보인다. 이는 수문모형을 GIS와 연계하여 구동할 경우 모형에 필요한 입력자료를 구축하는데 소요되는 시간과 노력을 절감할 수 있고 기존의 방법 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있으며, 복잡한 수문순환 과정을 분석하는데 효과적인 수단이기 때문이다.

GIS와 연계한 수문모형을 홍수유출, 침수모의에 적용할 경우 정량적인 침수피해 분석과 효과적인 배수개선 대책의 수립에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 예상된다. 국내의 침수모의에 관한 연구는 도시지역 유출해석 모형을 이용하여 도시배수계통에서의 침수상황을 모의하고 침수흔적과 비교하여 적용성을 평가한 바 있으며(Lee et al., 1988),⁶⁾ 흐름기본방정식과 SCS 삼각단위도법을 이용한 수위예측 수치모형을 개발하여 해남 간척농지의 침수상황을 모의하였다(Park et al., 2000).¹⁰⁾ 최근

GIS와 연계한 홍수범람을 모의할 수 있는 HEC-GeoRAS와 HEC-RAS 모형을 이용하여 Ahn et al. (2001)²⁾은 금강수계의 보청천 유역을 대상으로 홍수범람지역을 분석한 바 있고, Kim et al. (2001)⁴⁾은 발안유역을 대상으로 농경지 침수를 모의한 바 있으나, 모형의 보정과 검정을 통한 모형의 적용성을 평가하지 못하였다. 외국의 경우 Klaus(1999)⁵⁾는 Texas 주에 위치한 Mill 하천을 대상으로 HEC-GeoRAS를 이용하여 침수상황을 모의한 바 있으며, Ackerman(2000)¹⁾은 Arizona 주 Salt 강을 대상으로 홍수경감대책과 생태계 복원과의 관계를 평가하기 위하여 HEC-GeoRAS를 이용한 바 있으나, GIS를 이용한 홍수범람의 추정 과정에 초점이 맞추어져 실제 모형의 적용성을 평가하지 못하였다.

본 연구에서의 목적은 농경지 침수피해를 모의하기 위해 GIS 기반의 침수모의 시스템을 구축하고, 시험유역을 대상으로 실측자료를 획득하여 침수모의 시스템의 적용성을 평가하고 확률강우량에 따른 농경지 침수피해를 분석하는 데 있다.

II. 연구방법

1. 농경지 침수모의 시스템 구축

폭우시 유역홍수량 추정을 위한 수문모형으로 Kim et al. (2003)³⁾에 의해 적용된 바 있는 HEC-HMS(Hydrologic Modeling System) 모형과 GIS 인터페이스를 위한 HEC-GeoHMS 모듈을 선정하였다. HEC-HMS 모형은 미공병단(U.S. Army Corps of Engineering)에 의해 개발되었으며, HEC-1 모형을 계승 발전시킨 모형으로 유역에서의 강우-유출관계와 홍수추적 과정을 모의한다. HEC-GeoHMS 모듈은 미공병단에 의해 2000년 개발되었으며, 제한된 GIS 경험을 가진 수문기술자를 위해 개발된 지형공간자료 처리 모듈로 HEC-HMS 모형과 연동하여 운영되도록 설계되었

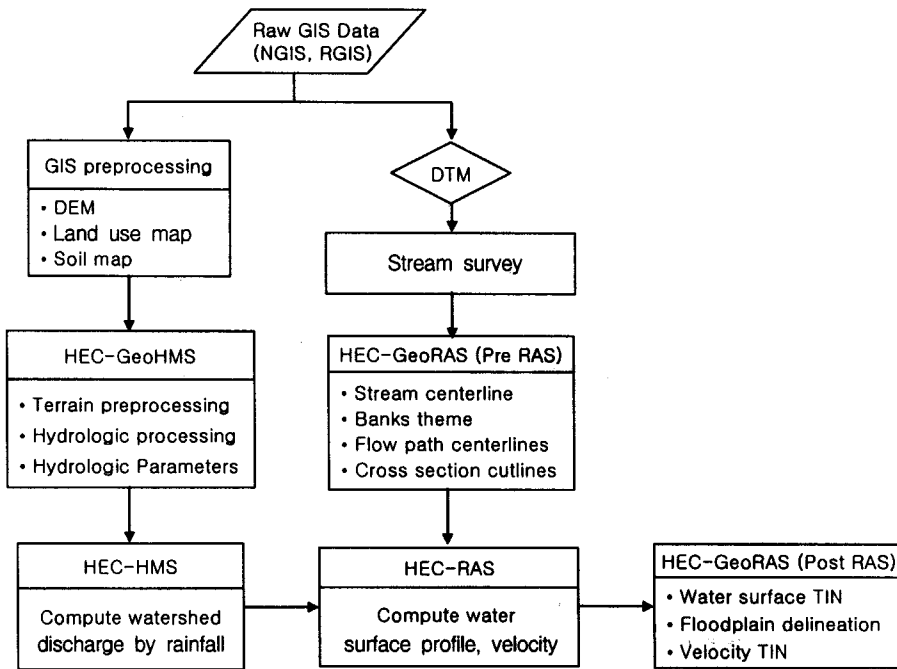


Fig. 1 Conceptual diagram of GIS based paddy inundation simulation system

다(U.S. Army Corps of Engineering, 2000, 2001).^{11),13)}

하도구간의 홍수추적과 침수모의를 위한 모형으로 HEC-RAS(River Analysis System) 모형과 GIS 인터페이스를 위한 HEC-GeoRAS 모듈을 선정하였다. HEC-RAS 모형은 HEC-2 모형을 발전시켜 개발된 모형으로 1차원 정상류, 부정류를 해석한다. HEC-GeoRAS 모듈은 HEC-RAS 모형의 지형정보 전후처리를 위해 ESRI(Environmental Systems Research Institute)에서 개발된 GIS 응용프로그램인 ArcView 확장모듈이다(U.S. Army Corps of Engineering, 2000, 2001).^{12),14)}

다음의 Fig. 1은 GIS를 이용한 농경지 침수모의

시스템의 개요를 보여주고 있다.

2. 대상유역

농경지 침수모의시스템의 적용성을 검토하기 위하여 경기도 화성시 발안면과 팔탄면에 위치한 발안 시험유역을 선정하였다. 발안 시험유역은 7개의 소유역으로 구분하여 운영하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문관측을 수행하고 있다. 본 연구에서는 HP#7 소유역을 시험유역으로 선정하여 시스템의 적용성을 분석하였으며, Fig. 2는 발안 시험유역과 본 연구에서 시험유역으로 선정한 HP#7 유역의 소유역 구분을 보여주고 있다.

Table 1 Watershed characteristics of study area

Sub watershed	Area (ha)	Flow length (km)	Shape coeff.	Relief (m)	Relief ratio	Slope (m/m)	Stream frequency (ea/km ²)
HP #7	1,068.8	6.95	2.272	285	0.0392	0.0073	1.47

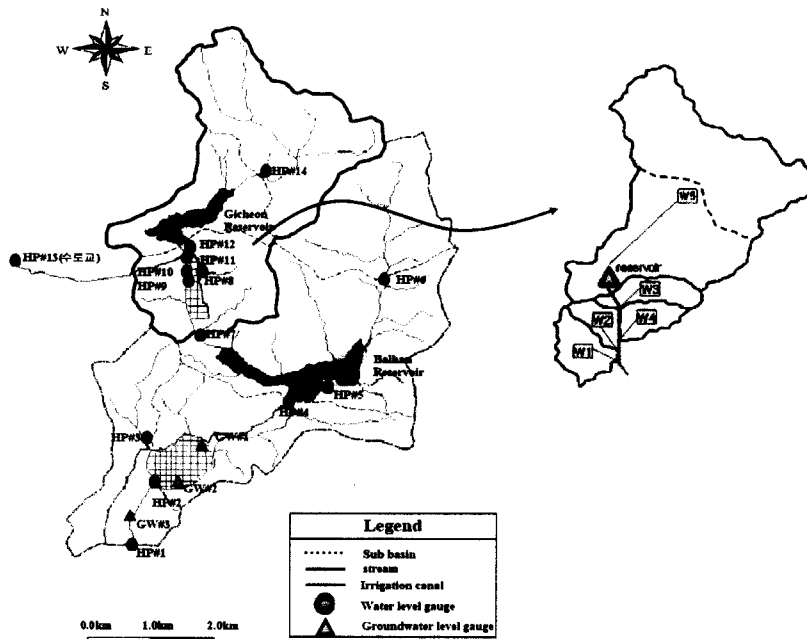


Fig. 2 Hydrological monitoring networks of study watershed

Table 1은 HP#7 소유역의 유역특성을 보여주고 있다.

3. 대상유역 자료구축

가. GIS 자료구축

국립지리원에서 구축한 1/5,000 NGIS 수치지도, 농촌진흥청에서 구축한 1/25,000 정밀토양도를 이용하여 DEM(digital elevation map), 사면경사도, 수문학적 토양군도 등의 주제도를 구축하였다. 토지이용도는 Landsat-5 TM 영상자료를 이용하였으며, 위성영상의 전처리와 분석은 ERDAS IMAGINE

8.4.0을 사용하였다. Landsat-5 위성은 1984년에 발사되었으며, 상공 700~900 km, 회전주기 16 일, 분광밴드는 7개이며, 공간해상력은 30 m×30 m이다. 분류 대상 위성영상은 Landsat-5의 Thematic Mapper Sensor에 의하여 관측된 Path 116/Row 34의 영상 중 남동쪽 사분을 사용하였다(Table 2). 대상영상은 경기도 일대와 서해지역, 충청북도, 그리고 서울 등의 일부지역이 포함되어 있다.

나. 수문자료 구축

시험유역의 수문관측은 강우량 측정, 하천수위 측정, 수위-유량관계 측정을 통해 이루어지며, 강

Table 2 Characteristics of Remote sensing data

No. of scene	Path-Row	Date	Time	Cloud coverage (%)	Data size (MB)	Remark
1	116-34	98/11/10	01:50:02	0	279.9	TM
2	116-34	96/09/01	01:27:59	1	279.9	TM

우량은 0.2 mm 단위로 측정이 가능한 티핑버킷형 자기우량계를 이용하여 측정하였고, 하천 수위는 부자식 자기 수위계와 압력식 수위계를 설치하여 관측하였다. 압력식 수위계는 Global Water사에서 만든 WL-14 Global Water Level Logger를 이용하였다. Fig. 3은 HP#7 지점의 1996년부터 2002년까지의 일별 강우 및 수위자료를 보여주고 있다. 수위-유량 관계는 연도별로 측정하여 자료를 구축하였으며, Table 3은 HP#7 지점에 대한 1996년부터 2002년까지의 수위-유량 관계를 보여주고 있다.

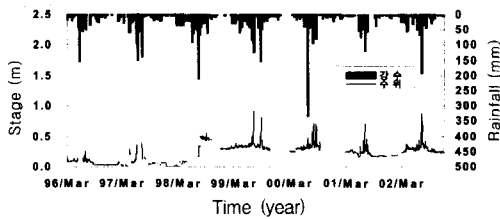


Fig. 3 Daily streamflow stage at HP#7 station

Table 3 Stage-discharge relationships at HP#7 station

Station	Stage-discharge relationship	R ²
HP #7	$Q = 18.045 h^{2.5378}$ (1996~1998/8)	0.916
	$Q = 249.87 h^{7.3164}$ (1998/9~2000)	0.903
	$Q = 7.2139 h^{2.9604}$ (2001~2002)	0.983

Q : Discharge (m³/s), h : Stage (m)

중심선 추출, 횡단면 속성 부여, 횡단면 표고 추출 등의 과정을 통해 HEC-RAS에서 필요한 지형관련 입력자료를 완성하게 된다. 다음의 Fig. 4는 HEC-GeoRAS를 이용해 구축한 TIN과 농경지, 하천 등의 레이어를 중첩하여 나타내고 있으며, Fig. 5는 HEC-GeoRAS를 이용해 구축한 하천관련 자료를 5m 간격 등고선자료와 중첩하여 보여주고 있다.

1/5,000 수치지도의 경우 등고선 간격이 5 m로 HEC-GeoRAS에서 하천의 횡단면을 추출하면 실제 하천의 형상과 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 대상유역의 하천구간에 대한 중·횡단 측량을 통해 하천지형자료를 입력하였다. Fig. 6은 시험유역 주하천의 종단측량 결과를 보여주고 있다.

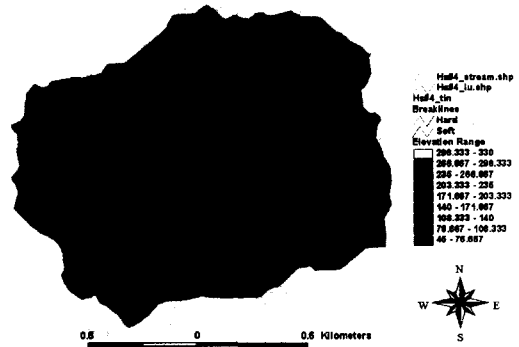


Fig. 4 Triangulated irregular network of project area

III. 연구결과

1. HEC-GeoRAS를 이용한 지형자료 구축

대상유역 NGIS 수치자료의 등고선 레이어(layer)를 추출하여 TIN(Triangulated irregular network) 자료를 생성하였으며, HEC-GeoRAS를 이용하여 수치지도의 농경지, 하천, 제방 등의 레이어를 중첩하여 대상유역에 대한 지형자료를 구축하고, 하천

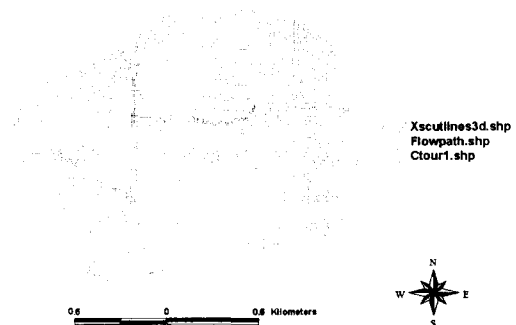


Fig. 5 Stream network establishment of project area

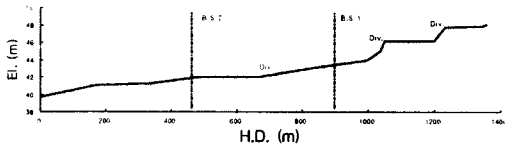


Fig. 6 Longitudinal section of the main stream

2. HEC-RAS 모형의 적용

HEC-RAS 모형의 적용을 위해 지형자료, 경계 조건, 초기조건, 지천유입량 등의 자료를 구축하여야 한다. 지형자료는 HEC-GeoRAS 모듈을 이용하여 구축한 자료를 HEC-RAS 모형에서 불러들여 지형관련 자료를 수정하고 하천단면 측량성과를 입력하였다. 경계조건은 상류 경계조건과 하류 경계조건으로 나누어지며, 본 연구에서는 상류 경계조건은 유량 수문곡선을 산정하여 입력하였고, 하류 경계조건은 실측 수위-유량 관계를 입력하였다. 초기조건은 과거 수문관측 자료를 이용하여 각 횡단면에서의 값을 입력하였다. 지천 유입량은 Kim et al. (2003)³⁾에 의해 적용성이 평가된 HEC-HMS 모형을 이용하여 산정하였다.

가. HEC-RAS 모형의 보정

HEC-RAS 모형의 보정을 위해 1996년부터 2000년 발생한 4개의 호우사상 자료를 이용하였으며, Fig. 7, Fig. 8은 침투유량과 침투시간에 대한 모형의 보정결과를 보여주고 있으며, Table 4는 모형의 보정결과를 정리하여 보여주고 있다. 강우량 33.5 mm에서 303.6 mm의 4개 사상에 대한 모형의 보정결과, 침투유량의 RMSE는 11.862 m³/s, 침투시간의 RMSE는 0.698 h로 나타났다.

나. HEC-RAS 모형의 검증

HEC-RAS 모형의 검증을 위해 1997년부터 2001년까지 발생한 4개의 호우사상 자료를 이용하였으며, Fig. 9, Fig. 10은 침투유량과 침투시간에

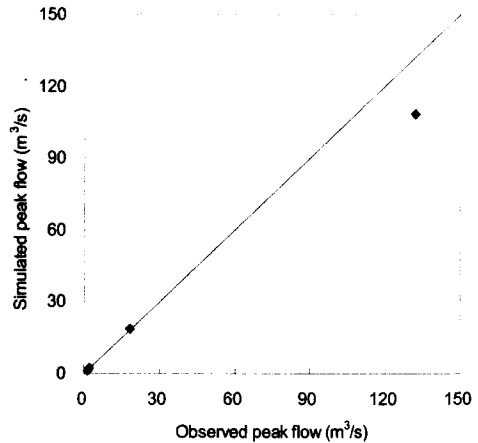


Fig. 7 Scatter diagram of peak flow for calibration

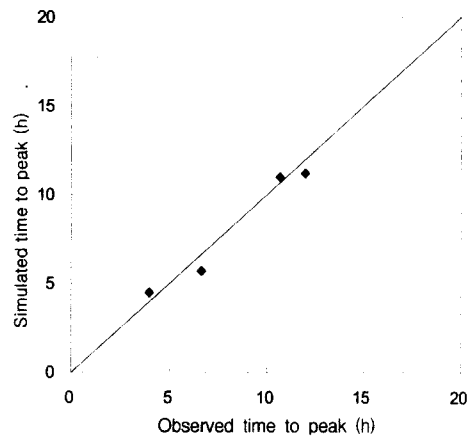


Fig. 8 Scatter diagram of peak flow for calibration

대한 모형의 검증결과를 보여주고 있으며, Table 5는 모형의 검증결과를 정리하여 보여주고 있다. 강우량 46.5 mm에서 139.5 mm의 4개 사상에 대한 모형의 검증결과, 침투유량의 RMSE는 1.296 m³/s, 침투시간의 경우 RMSE는 1.009 h로 나타났다.

4. 모형의 응용

시험유역을 대상으로 검증된 농경지 침수모의 시

Table 4 Calibration result of HEC-RAS model for HP#7 watershed

Storm event	Rainfall (mm)	AMC	Peak flow (m ³ /s)		Time to peak (h)	
			Observed	Simulated	Observed	Simulated
1996/07/15	39.0	1	1.277	1.160	6.67	5.70
1996/07/27	33.5	1	1.900	2.190	4.00	4.50
1997/06/30	139.5	1	18.320	18.870	12.00	11.20
2000/07/22	303.6	1	132.196	108.480	10.66	11.00
R squared	-	-	-	0.9989	-	0.9578
RMSE	-	-	-	11.862	-	0.698

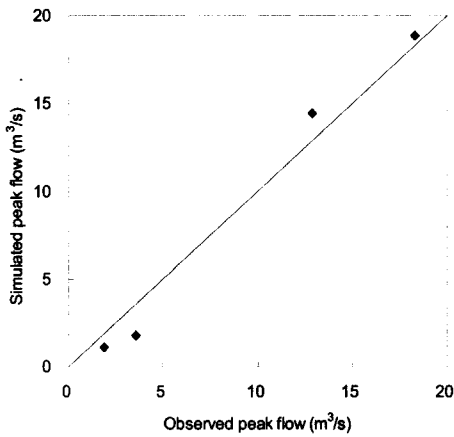


Fig. 9 Scatter diagram of peak flow for verification

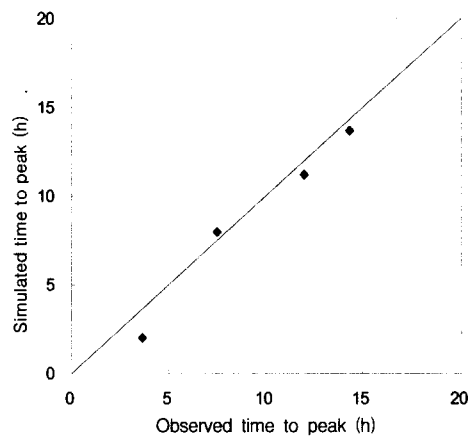


Fig. 10 Scatter diagram of peak flow for verification

Table 5 Verification result of HEC-RAS model for HP#7 watershed

Storm event	Rainfall (mm)	AMC	Peak flow (m ³ /s)		Time to peak (h)	
			Observed	Simulated	Observed	Simulated
1997/06/25	53.5	2	3.587	1.770	7.50	8.00
1997/06/30	139.5	1	18.320	18.870	12.00	11.20
2000/07/22	46.5	1	1.908	1.122	14.33	13.70
2001/07/30	137.6	3	12.871	14.450	3.67	2.00
R squared	-	-	-	0.9887	-	0.9711
RMSE	-	-	-	1.296	-	1.009

시스템을 이용하여 빈도별 확률강우량에 따른 농경지 침수상황을 모의하였다. 시험구역의 확률강우량은 Ministry of Construction and Transportation

(2000)에서 제시하고 있는 수원 지점의 확률강우량을 이용하였으며, 수원측후소의 지속시간별 재현 기간에 따른 확률강우량은 다음 Table 6과 같다.

Table 6 Probability rainfall in Suwon

Duration (h)	Return period (year)					
	2	10	20	50	100	200
24	160.7	275.9	319.9	376.9	419.5	462.1
48	179.7	306.4	354.7	417.4	464.3	511.0

시험유역의 재현기간별 강우강도-지속시간은 Ministry of Construction and Transportation (2000)에서 제시하고 있는 강우강도식을 이용하였으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$I(t, T) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^n}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $I(t, T)$ 는 강우강도 (mm/h), t 는 강우 지속시간 (min), T 는 재현기간 (year), a, b, c, d, n 은 각 지점의 회귀상수이다. 건설교통부에서 제시하는 수원지점의 회귀계수는 Table 7과 같다.

강우분포모형은 Huff 방법을 이용하였다. 산정된 확률강우량 자료를 이용하여 발안 HP#7 시험유역을 대상으로 홍수량을 산정하고 침수모의를 수행하였다. 다음의 Fig. 11, Fig. 12는 지속시간 24시간 10년 빈도 강우량에 대한 모의결과를 보여주고 있으며 각각 12시간, 13시간이 경과한 후의 침수상황을 보여주고 있다.

침수모의결과를 이용하여 벼 생육단계별로 강우 재현기간에 따른 침수면적을 산정하였다. Table 8 은 분얼기(TS), 유수형성기(PS), 감수분얼기(RS),

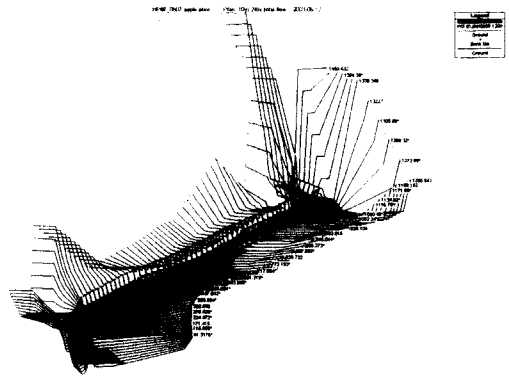


Fig. 11 Inundation simulation result of 24-hour duration, 10-year return period rainfall when 12 hours elapsed

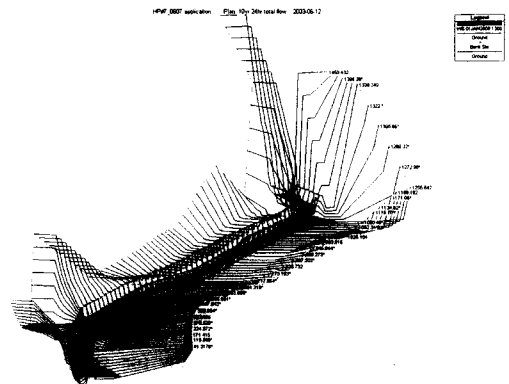


Fig. 12 Inundation simulation result of 24-hour duration, 10-year return period rainfall when 13 hours elapsed

출수기(HS), 등숙기(RPS) 등의 벼 생육단계별 재현기간에 따른 지속시간별 침수면적 추정결과를 보여주고 있다.

Table 7 Coefficients of rainfall intensity equation in Suwon

Station	Period	Coefficients					R ²
		a	b	c	d	n	
Suwon	0~30min	79.1287	78.0319	-0.2551	0.1088	-0.6026	0.999
	30min~	828.3783	144.8427	4.9127	0.1139	0.6580	0.995

Table 8 Submerged paddy areas of study watershed by probability rainfalls

Growth stage	Rainfall duration (h)	Submerged paddy area (ha)				
		10yr	20yr	50yr	100yr	200yr
TS	24	8.15	8.97	9.88	10.47	10.99
	48	5.79	6.39	7.19	7.73	8.21
PS	24	6.90	7.73	8.65	9.24	9.77
	48	4.55	5.18	5.94	6.42	6.96
RS	24	5.64	6.48	7.40	8.00	8.53
	48	3.26	3.91	4.67	5.21	5.70
HS	24	5.51	6.36	7.28	7.88	8.41
	48	3.14	3.78	4.55	5.09	5.57
RPS	24	5.51	6.36	7.28	7.88	8.41
	48	3.14	3.78	4.55	5.09	5.57

* TS : tillering stage, PS : panicle formation stage, RS : reduction division stage, HS : heading stage, RPS : ripening stage

③ 농경지 침수모의를 위한 HEC-RAS 모형의 적용을 위해 초기조건, 경제조건, 횡유입량을 산정하여 입력하였으며, HEC-RAS 모형의 보정결과 침두유량 RMSE는 11.862 m³/s, 침두시간 RMSE는 0.698 h로 나타났으며, 모형의 검정결과 침두유량 RMSE는 1.296 m³/s, 침두시간 RMSE는 1.009 h로 나타났다.

④ 수원지점 강우량 자료를 이용하여 빈도별 확률강우량에 따른 침수상황을 모의하였다. 분얼기(TS), 유수형성기(PS), 감수분열기(RS), 출수기(HS), 등숙기(RPS) 등의 벼 생육단계별 재현기간에 따른 지속시간별 침수면적을 추정하였다.

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 GIS 기반의 유역홍수유출, 하천홍수추적 및 침수모형을 이용하여 농경지 침수모의 시스템을 구축하고, 발안 유역의 HP#7 소유역을 시험유역으로 선정하여 지형자료의 구축과 수문자료를 이용하여 침수모의 시스템을 적용하고, 확률강우량에 따른 침수모의를 수행하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 농경지에서의 침수피해를 모의하기 위해 유역홍수추적 모형과 하천 홍수추적모형을 연계하여 GIS 기반의 농경지 침수모의 시스템을 구성하였다.

② 농경지 침수모의 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 서울대학교에서 1996년부터 수문자료를 구축하고 있는 경기도 화성시에 위치한 발안 시험의 HP#7 유역을 시험유역으로 선정하고, 시험유역을 대상으로 NGIS 수치지도, 위성영상자료, 개략도양도 등을 이용하여 지형자료를 구축하고, 강우량, 하천수위, 수위-유량관계, 직접유출량 등의 수문자료를 구축하였다.

References

1. Ackerman, C. T., 2000. Hydraulic Modeling of the Salt River, Arizona Using HEC-GeoRAS, 2000 ESRI International User Conference - June 26-30, 2000
2. Ahn, S. J., C. H. Ham, J. S. Kim, and G. S. Kim, 2001. Analysis of Flood Inundation Area Using Geographic Information System, *The Proceeding of 2001 Korea Water Resources Association* : 1062-1067. (in Korean)
3. Kim, S. M., C. H. Sung, and S. W. Park, 2003, Flood Runoff Analysis for Agricultural Small Watershed Using HEC-HMS Model and HEC-GoeHMS Module, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 45(6) : 119-127. (in Korean)
4. Kim, S. M., and S. W. Park, 2001. Application of Inundation Simulation Model using GIS, *2001 Proceeding of Korean Society of Agricultural Engineers* : 314-318. (in Korean)
5. Klaus, R. A., 1999. Flood Plain Determination

- nation Using ArcView and HEC-RAS, 1999 *ESRI International User Conference - July 26-30, 1999*
6. Lee, Y. D., and S. W. Park, 1990. Development and Application of Hydrologic Model of Storm Sewer Runoff at Small Urban Area, *Journal of Korea Water Resources Association* 23(3) : 329-340. (in Korean)
 7. Ministry of Agriculture and Forestry, 1997. Development of Flood Analysis System for Drainage Improvement. (in Korean)
 8. Ministry of Agriculture and Forestry, 2001. Planning and Design Guideline for Land and Water Development Project (Drainage). (in Korean)
 9. Ministry of Construction and Transportation, 2000. 1999 Report of Research and Investigation of Water Resources Management Method Development, Vol 1. Probability Rainfall Map.
 10. Park, C. E., K. H. Yoo, and S. W. Park, 2000. A Mathematical Model to Forecast Flood-Stages of a Reclaimed Tidal Flat, *2000 ASAE Annual International Meeting*. Paper No. 002134.
 11. U.S. Army Corps of Engineering, 2000. HEC-GeoHMS(Version 1.0): Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
 12. U.S. Army Corps of Engineering, 2000. HEC-GeoRAS(Version 3.0): An Extension for support of HEC-RAS using ArcView, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
 13. U.S. Army Corps of Engineering, 2001. HEC-HMS(Version 2.1): Hydrologic Modeling System, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
 14. U.S. Army Corps of Engineering, 2001. HEC-RAS(Version 3.0): River Analysis System, User's Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.