

XP-SWMM을 이용한 도시하천에서의 홍수소통능력 평가

Assessment of Flood Flow Conveyance for Urban Stream Using XP-SWMM

홍준범* / 김병식** / 서병하*** / 김형수****

Hong, Jun-Bum / Kim, Byung-Sik / Seoh, Byung-Ha / Kim, Hung-Soo

Abstract

In recent, increasing of the impervious area gives rise to short concentration time and high peak discharge comparing with natural watershed and it is a cause of urban flood damage. Therefore, we have performed for structural and non-structural plans to reduce the damage from inundation. The Gulpo-cheon basin had been frequently inundated and damaged due to the water level of Han river. So, the Gulpo-cheon floodway was constructed with 20 meters width for flood control in the basin but it was not enough for our expectation and now we have a plan to expand the floodway to 80 meters. We use a XP-SWMM model developed based on EPA-SWMM version for analyzing the capacity of flood conveyance by the expansion of Gulpo-cheon floodway with the same 100 years return period design storm and the same tidal conditions of the Yellow sea. The flood conveyance after the expansion of floodway becomes three times comparing it with before the expansion. Also we simulate the flood discharge at the diversion point of Gulpo-cheon for the expanded condition of floodway and know that the discharge of about 300 m³/sec is flowing backward to the expanded floodway. Therefore we may need some kinds of hydraulic structures to prevent the back water.

keywords : Gulpo-cheon floodway, flood flow conveyance, urban rainfall-runoff model, XP-SWMM

요 지

최근 급속한 도시화로 인한 유역 내 불투수 면적의 증가는 자연유역에 비해 짧은 도달시간과 높은 첨두 홍수량을 유발하여 도시홍수 피해의 원인이 되고 있다. 따라서 홍수피해를 저감시키고자 구조물적 또는 비구조물적 홍수방어 대책들을 마련하여 시행하고 있다. 본 연구의 대상유역인 굴포천 유역은 유역 내의 유출 특성이 아닌 하류의 한강 외수위 조건에 의해 잦은 침수 피해가 발생하고 있으며, 이를 예방하고자 폭 20m의 임시 방수로를 폭 80m로 확장할 예정이다. 이에 따라 본 연구에서는 대표적인 도시 유출 모형의 하나인 EPA의 SWMM 모형을 근간으로 하는 XP-SWMM 모형을 이용해 굴포천 방수로 확장에 따른 홍수소통능력을 분석하였다. 재현기간 100년인 설계 강우와 동일한 조위 조건 하에서 개수전과 후에 대한 수위와 유량을 비교하였으며, 분석결과 개수전 상황이 개수후에 비해 통과 유량이 1/3임에도 불구하고 비슷하거나 더 높은 수위를 나타내었다. 또한 개수후 상태에서 모의한 결과 방수로

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원, 공학석사
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, 2311, Korea (e-mail: hongjb@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원, 공학박사
Senior Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, 2311, Korea (e-mail: hydrokbs@kict.re.kr)

*** 인하대학교 토목공학과 교수, 공학박사
Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea (e-mail: seohydro@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea (e-mail: sookim@inha.ac.kr)

분기점에서 자연 분류시킬 경우 최고 300m³/sec 에 가까운 유량이 방수로 방향으로 역류함을 확인할 수 있었다. 따라서 방수로의 안정적 운영을 위해서는 굴포천 하류로부터 방수로로의 역류를 차단하기 위한 수리 시설물의 설치와 필요함을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 굴포천 방수로, 홍수소통능력, 도시유출모형, XP-SWMM

1. 서론

급격한 도시화는 불투수지역의 증가에 따른 유출특성의 변화를 가져왔다. 일반적으로 도시화가 이루어진 유역은 자연 유역에 비하여 침투유량의 증가와 함께 도달시간이 짧아지는 특징을 보이고 있다. 또한 개발지역의 확대는 하천 주변까지 인간의 생활 영역이 넓어지고 있으며, 변화된 유출특성에 따라 홍수 위험에 대한 노출성이 증가하고 있다. 도시지역은 주거, 산업, 상업 시설의 밀집에 의해 홍수가 발생할 경우 일반 자연유역에 비하여 더 많은 재산 및 인명피해가 발생하게 된다.

1960년대 중반이후 강우-유출 체계에 대해 모의하기 위하여 컴퓨터 모형들을 사용하기 시작하였다. 1970년대 초반에 강우의 양과 질을 모의할 수 있는 모형들이 US EPA와 같은 미국의 정부기관들에 의하여 개발되기 시작하였다. 그 후 간단한 개념적 모형부터 복잡한 수리모형에 이르기까지 많은 도시유출 모형이 개발되었다. 도시지역의 배수 및 오수 시스템을 분석하기 위해 사용되고 있는 대표적인 소프트웨어는 MOUSE, InfoWorks, SWMM(EPA SWMM, MIKE SWMM, XP-SWMM) 등이 있다. 이러한 종류의 컴퓨터 모형들은 강우와 홍수사이의 복잡한 상호작용을 이해하기 위하여 자주 사용되고 있다. 컴퓨터 모형의 사용은 현재 상태에 대한 분석 및 이해가 실시되었을 경우, 여러 가지 변화가 가능한 상황에 대한 모의를 통해 최적의 배수 및 홍수 방어 대책을 수립할 수 있다는 장점이 있으며, 국내에서도 ILLUDAS, SWMM 등과 같은 도시유출 모형을 사용하여 도시구간의 배수체계 및 홍수에 대한 많은 연구가 진행 중이다.

이중 SWMM을 사용한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Hsu et al.(2000)은 SWMM 모형을 이용하여 관망의 Node(절점)에서 잉여수(surcharge water)에 의해 발생하는 침수에 대하여 모의하였다. Zaghoul et al.(2001)은 SWMM을 이용한 도시 유출 모의 시 신경망 이론을 이용하여 매개변수 최적화를 실시한 결과 만족할 만한 성과를 얻을 수 있었다. 또한 Campbell et al.(2002)은 SWMM의 뛰어난 수리 계산 능력을 이용하여 석회암 지대 동굴(Stephens Gap Cave) 지표수의 손실량 산정에 적용하여 단순한 웨어 유출 모형 등에서

보다 뛰어난 결과를 얻을 수 있었다. 특히 Maitland et al.(1999)은 XP-SWMM32를 호주, 일본, 미국의 시험 유역에 적용하여 모형의 적용성을 검토한 결과 개수로와 관수로 등 복잡한 배수 체계의 해석에서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

국내에서는 이종태(1998)가 SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1 모형을 서울시 홍제천에 적용한 결과 SWMM이 가장 적합한 결과를 얻었다. 또한 안상진과 김진극(1999)이 SWMM과 ILLUDAS를 비교하기 위하여 청주의 용암지구에 적용한 결과, SWMM 모형의 RUNOFF 블록과 TRANSPORT 블록을 사용한 경우, ILLUDAS 보다 실측치에 근접하는 결과를 얻었다. 강금석(1995)은 GIS 시스템을 이용해 SWMM의 입력자료에 필요한 지형자료를 추출하여 도시유출 모의를 실시하였다. 김충수(2002)는 SWMM을 이용하여 도시유출을 모의하고 유전자 알고리즘을 통하여 매개변수를 최적화 하였다. 또한 도시 유역에서 하도만을 모의한 경우와 하수관거를 결합하여 모의한 결과를 비교하여 관거를 결합한 경우가 총유출량에는 큰 차이가 없으나 유출 수문곡선의 꼬리 부분에서 관측치에 보다 유사한 결과를 얻었다. 그리고 유역 내 비점오염원의 배출량을 산정하기위하여 이준우 등 (2001)은 SWMM을 도시 유역이 아닌 간척 담수호 유역에 적용하여 유역내 비점오염원의 배출을 모의한 바 있다.

국내에서도 일부 도시지역의 경우 해마다 반복적인 침수 피해를 입고 있다. 특히 본 연구에서 대상유역으로 설정한 굴포천 유역 또한 상습적인 홍수 피해를 입고 있으며, 이를 해결하기 위하여 구조물적인 방법의 하나인 방수로를 건설하여 유출량을 서해로 직접 배출시킬 계획을 수립하였다. 본 연구의 목적은 기존의 굴포천 유역에 건설되어 있는 폭 20m의 임시방수로를 폭 80m의 방수로로 확장 공사를 실시할 경우 홍수소통능력의 개선 효과를 XP-SWMM을 이용하여 분석하였다.

2. XP-SWMM의 기본구조

2.1 XP-SWMM 모형의 개요

XP-SWMM은 미국 XP Software사에서 EPA SWMM을 사용자의 편의 확보를 위하여 윈도우화 한

것으로 기본적인 해석 방법이나 구조는 SWMM과 동일하므로, 본 절에서는 EPA SWMM의 기본 구조와 이론을 설명함으로써 XP-SWMM에 대한 이해를 돕고자 한다.

SWMM은 도시 우수 유출과 합류식 관거 범람을 재현할 수 있도록, EPA의 지원으로 Metcalf and Eddy, the University of Florida, Water Resources Engineers 콘소시엄이 1969~71년에 개발하였다. 이후 1981년에는 SWMM 모형내의 TRANSPORT 블록을 확장, 보완하기 위해 수공구조물의 월류, 배수, 압력류 등의 계산이 가능하도록 설계된 EXTRAN 블록을 SWMM 모형에 포함시켜 보완하였다.

SWMM 모형은 기본적으로 도시구역이나 인위적 배수계통을 갖는 구역에 대해 유출 모의가 가능한 모형으로 단일·연속강우에 의한 계산이 가능하고, 강우간격은 임의로 설정할 수 있으며, 연산 시간간격은 강우사상에 대해 임의조정이 가능하다. 공간적 특성은 작은 배수구역에서 큰 배수구역까지 적용이 가능하고 배수구역은 수백 또는 수천개(제공되는 모듈에 따라 한계가 있음) 소유역 및 관로를 구성할 수 있다. SWMM 모형은 도시구역내에 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용 계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다. SWMM 모형의 물리적 특성은 유출이 강우와 용설로 발생하며 지표면 유출은 비선형 저류방정식을 사용한다. 침투량 산정에는 Horton 또는 Green-Ampt 식을 사용하고, 수로/관로의 수리해석을 수행하는 RUNOFF블록에서는 비선형 저류방정식, TRANSPORT블록에서는 운동과 (Kinematic wave) 방정식, EXTRAN 블록에서는 동역

학(Dynamic) 방정식과 연속방정식을 사용한다. 저류추적방법은 수표면이 평행하다고 가정한 수정 Pulse 방법을 사용한다.

2.2 SWMM 모형의 기본구조

SWMM 모형의 구성은 Fig. 1과 같이 4개의 실행블록들과 6개의 보조블록들로 구성되며, 126개의 부 프로그램들을 포함하고 있다. 개발 초기에는 RECEIVING WATER 블록을 포함하여 5개의 실행블록이 있었으나, 1981년 이후 RECEIVING WATER 블록은 SWMM 모형에서 제외되었다.

3. 모형의 적용

3.1 대상구역

굴포천은 한강 하류부에 위치한 한강의 제 1지류로서 인천광역시 남동구 간석동에 위치한 철마산(EL. 201 m)에서 발원하여 북쪽 인천광역시 부평구의 도심지와 공업지대를 거쳐 부천시를 관통하여 경기도 김포군 고촌면 신곡리의 신곡양·배수장에 이르는 총 유역면적 133.8 km², 유로연장이 20.73 km의 지방 2급 하천이다.

굴포천 유역은 평균고도가 EL. 21.5m이며, EL. 10m 이하의 유역이 38%, EL. 30m 이하의 유역이 73% 정도인 저지대의 유역으로서 하도를 중심으로 매우 완만한 구릉지를 형성하고 있으며, 굴포천 중·하류부 이하에서는 1/5,000 ~ 1/15,000, 상류측에서는 1/200 ~ 1/800 정도로 전체적으로 완만한 하상구배를 나타내고 있어 상대적으로 적은 강우에서도 쉽게 피해가 발생할 수 있는 지형적 요소를 가지고 있다. 또한 굴포천은 호우 발생 시 굴포천 하류의 신곡 양·배수장에서의 강제 배수

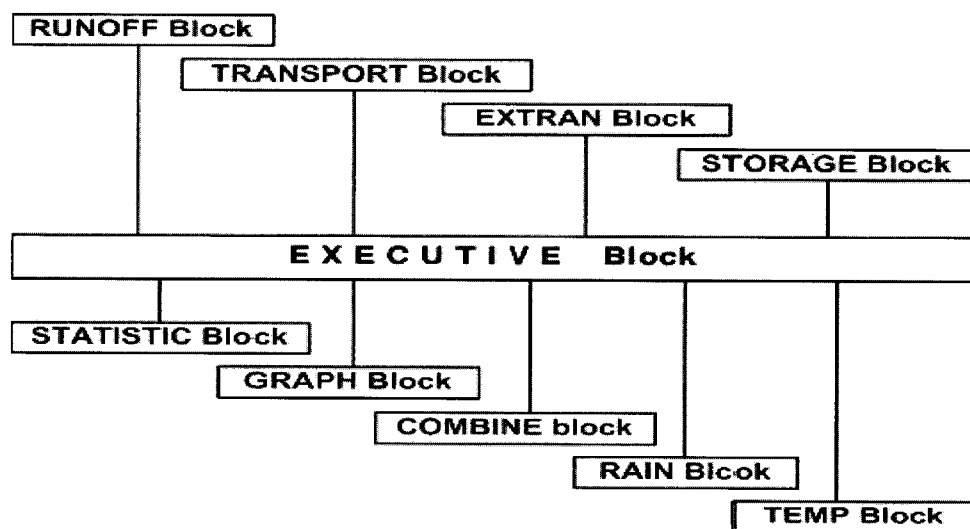


Fig. 1. Structure of SWMM

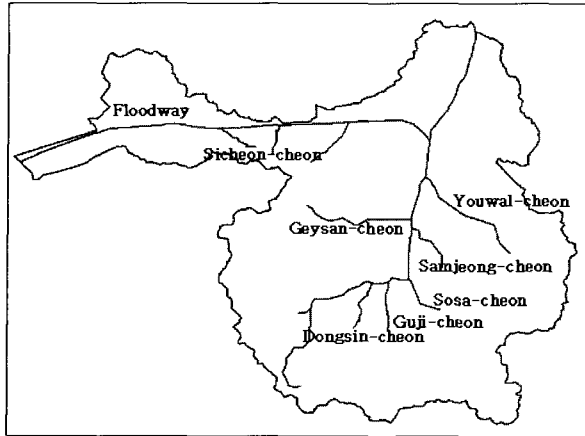


Fig. 2. Gulpo Cheon Basin

를 통하여 홍수량을 배제하고 있다. 이에 따라 굴포천 유역 자체의 유출 특성보다는 한강 외수위의 영향에 따라 잦은 침수 피해를 겪어 왔으며, 이를 해결하기 위하여 굴포천 유역의 유출량을 서해로 직접 배제하기 위하여 현재 폭 20m의 굴포천 방수로가 건설되어 있으며 이를 80m로 확장하기 위한 공사가 예정중이다. 다음 Table 1은 굴포천 유역의 주요 홍수피해를 수록한 것이다.

3.2 설계강수량 및 확률강우강도 산정

굴포천 유역 주변에는 서울(1961~2003), 인천(1961~2003), 구로(1986~2003), 김포(1965~2003), 김포공항(1984~2003), 부천(1980~2003)의 6개 강우관측소의 강수량 자료를 수집할 수는 있지만 서울 관측소는 본 유역과 거리가 너무 멀어 티센계수 산정 시 그 값이 매우 적어 사용하기에는 무리가 있으며 인천을 제외한 나머지 관측소는 자료의 관측년수가 작거나 결측자료가 많아 강우빈도분석을 실시하기에는 다소 무리가 있다고 판단되었다. 그래서 본 논문에서는 기존의 굴포천 관련 보고서에서 사용한 바 있는 인천 관측소의 자료를 이용

하기로 결정하였다.

3.2.1 적합도 검정

본 연구에서는 FARD 2002를 이용하여 인천관측소의 지속기간별(1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간, 6시간, 8시간, 9시간, 12시간, 13시간, 14시간, 16시간, 18시간, 24시간) 연 최대 강수량자료를 대상으로 수문자료 계열의 확률빈도 해석에 많이 이용하고 있는 Gamma (GAM), General extreme value(GEV), Gumbel(GUM), Log-Gumbel(LGU), Lognormal(LN), Log-Pearson type III(LP3), Weibull(WBU), Wakeby(WKB) 분포형들에 대하여 적합도검정을 실시하여 이를 토대로 적정 확률분포형을 선정하였다. 적합도 검정방법으로는 Chi-Square test(χ^2 -검정), Kolmogorov-Smirnov test (KS-검정), Cramer Von Mises test(CVM-검정), Probability Plot Correlation Coefficient test(PPCC-검정)를 사용하였으며, 각 분포형의 매개변수를 추정하기 위하여 PWM(확률가중모멘트법)을 이용하였다. 적합도 검정 결과, 13개 분포형 중 GEV 분포형은 4가지 적합도 검정을 모두 만족하였으며, Gumbel 분포형의 경우 지속시간 8시간에서 χ^2 -검정을 제외한 적합도 검정을 모두 만족하였다. 따라서 본 연구에서는 GEV 분포형과 Gumbel 분포형을 최적 확률분포형으로 선정하여 지속기간별 확률강수량 및 강우강도를 산정하였다.

3.2.2 확률 강우량 산정

기존의 경인운하 관련 보고서들을 살펴보면 설계홍수량을 산정하기 위하여 100년 빈도 24시간 지속기간의 강우량을 이용하고 있다. 그러므로 본 연구에서 산정된 값과 기존의 관련보고서에서 채택된 값을 비교해 보면 본 과업에서 GEV 분포형을 통해 얻은 확률강우량은 기존의 보고서에서 제시한 확률강우량 보다 지나치게 과대 산정되었음을 알 수 있었다. 그러나 GUM 분포형의 경우는 기존의 값보다 증가하기는 하였으나 1998년

Table 1. Flood record of Gulpo Cheon (MOCT, 2002)

Duration	Daily max. rainfall (mm)	Return period (Year)	Han River max. water level (EL. m)	High water level duration (Hr, 4.5 m)	Gulpo Cheon highest water level (EL. m)	Inundation duration (day)
1972. 8. 19 ~ 8. 21	349	90	8.83	90	6.93	4
1977. 7. 8 ~ 7. 9	327	70	4.37	-	5.17	1.5
1984. 8. 31 ~ 9. 1	288	35	8.77	110	6.34	5
1987. 7. 26 ~ 7. 27	343	80	7.22	60	6.42	4
1990. 9. 9 ~ 9. 13	255	25	9.60	75	6.44	4
1998. 8. 3 ~ 8. 15	156	5	8.05	12	5.97	6
1999. 7. 30 ~ 8. 3	239	20	7.95	104	6.90	4.5

Table 2. Result of Goodness of fit test

Distribution	Duration (hr)													
	1	2	3	4	5	6	8	9	12	13	14	16	18	24
GAM2	P	P	P	P	P	-	P	P	P	P	P	O	P	P
GAM3	-	O	-	-	-	-	-	-	O	-	-	-	-	-
GEV	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
GUM	O	O	O	O	O	O	C	O	O	O	O	O	O	O
LGU2	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX
LGU3	-	-	PX	PX	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LN2	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
LN3	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
LP3	PX	PX	PX	-	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX	PX
WBU2	C	O	P	P	P	-	-	-	C	-	C	C	C	-
WBU3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WKB4	PX	PX	PXC	PXC	PX	PX	PXC	PX	PX	PX	PXC	PXC	PXC	PX
WKB5	PX	PXC	PXC	PX	PX	PXC	PXC	PXC	PXC	PXC	PXC	PX	PX	PX

O : ALL GOODNESS OF FIT TESTS ARE CANNOT BE REJECTED
 P : ONLY PPCC TEST IS REJECTED
 C : ONLY CHI-SQUARE TEST IS REJECTED
 PX : PPCC TEST IS NOT PERFORMED
 PXC : PPCC TEST IS NOT PERFORMED AND ONLY CHI-SQUARE TEST IS REJECTED
 - : OTHERS

이후 연 강우량이 증감함을 고려한다면 적절하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 GUM 분포형에서 얻은 확률강우량을 이용하여 계획홍수량을 산정하고자 한다.

지난 38년간 인천지방의 호우 사상 1000개를 비교한 ‘지역적 설계 강우의 시간적 분포’ (건설교통부, 2000)에 의하면 전체 호우 사상에 대하여는 1구간에 해당하는 호우사상이 3구간 보다 약간 많으나 그 차이가 나지 않으며, 평균 강우 강도보다 큰 강우의 경우 3구간이 가장 높은 비율을 보였다. 따라서 본 연구에서는 Huff의 4분위법 중 3분위를 선택하여 앞 절에서 구한 설계 강우량을 시간간격 10분으로 등분포 시켜 XP-SWMM에 입력하였다.

3.3 XP-SWMM 입력 자료의 구성

3.3.1 강우자료의 구성

설계 강우량을 지속시간에 따라 분포시켜 입력하기 위하여 과거 강우사상의 통계적 특성 값을 고려하는 Huff의 4분위법(Huff's quartile method)을 이용하였다.

Table 3. Comparison of the frequency based rainfalls estimated from previous and this studies (unit : mm)

DATA	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧		
Year	1988	1991	1993	1995	1996	1997	1998	2004		
Period of data	1952~ 1987	1952~ 1990	1952~ 1992	1952~ 1992	1952~ 1994	1952~ 1996	1952~ 1997	1961-2002		
Distribution	LP III	LP III	LP III	LP III	LP III	LP III	LP III	GEV	GUM	
Frequency based rainfall	5-yr	173	165	166	166	161	159	162	199	210
	10-yr	211	204	204	204	199	197	203	252	256
	20-yr	250	246	243	243	239	238	249	311	299
	50-yr	302	306	298	298	297	300	319	401	355
	100-yr	344	357	343	343	346	354	380	480	397

- ① Ministry of Construction & Transportation(MOCT), 1988
- ② MOCT, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), 1991
- ③ MOCT, KOWACO, 1993
- ④ MOCT, KOWACO, 1995
- ⑤ KOWACO, 1996
- ⑥ KOWACO, 1997
- ⑦ Incheon Metropolitan City, 1998)
- ⑧ Estimated in this study

3.3.2 홍수량 산정을 위한 입력 자료 구성

XP-SWMM 모형은 RUNOFF Layer에서 강우-유출 모의하기 위하여 크게 비선형 지수 방법, 운동파 방법, Laurenson 비선형 방법, SCS 단위 수문 곡선 방법, 시간/면적과 합리식의 5가지 방법 중 하나를 선택 하도록 되어있다. 본 연구에서는 유출에 적용되는 비선형 유출 경로 방법의 대안으로 SCS National Engineering Handbook(Soil Conversion Service, 1972) 4장에 기술된 SCS 방법에 의해 유출량을 산정하였다.

(1) 투수곡선 번호 및 도달시간의 산정

투수곡선 번호 값은 높은 투수성과 차단 능력을 가진 지역 20에서 불투수 지역 95까지 다양하다. 수문 토양 그룹, 지표 형태, 수문학적 상태, 선행 습윤 상태 등에 따라 정해지는 지수이다. 유효 범위는 0에서 100까지이며, 전형적으로 60에서 90사이의 수가 사용되고, 불투수 지역에서는 98을 사용한다. 본 연구에서는 기존의 굴포천 유역에 대한 보고서 자료를 종합하여 각 소유역에 대한 CN 값을 결정하였으며, 선행 습윤 상태는 AMC-III으로 결정하였다.

또한 본 연구에서는 도달시간의 산정을 위하여 SCS 방법을 사용하여 도달시간을 산정하였다. SCS 방법은 박류(sheet flow) 또는 지표류(overland flow)와 얇게 집중된 흐름의 평균 시간을 정량화 가능한 경사나 토양형 등의 함수로 나타내므로 효과적인 결과를 얻을 수 있기 때문이다(Walesh, 1989). SCS 방법에 의한 도달시간의 산정식은 다음과 같다.

$$t_c = \frac{100L^{0.8}\{(1000/CN) - 9\}^{0.7}}{1900S^{0.5}} \quad (1)$$

여기서, t_c 는 도달시간(min), S는 유역경사, L은 유로연장(ft)이다.

(2) 형상인자

SCS 방법에서 사용하는 수문곡선의 형상계수나 침

투율 인자로서 단위 수문곡선의 시간 간격 및 침투에 영향을 주는 인자이다. 그 범위는 평평한 습지 지역의 300에서 험한 지형의 600까지 다양하며 일반적으로 484의 값을 갖는다. 미 토양보존국(Soil Conversion Service, SCS)에서는 대부분의 유역에 대해 수문 곡선 형태 지수를 484로 정의 하였다. 이는 다양한 크기와 지형 위치를 가진 많은 유역을 대상으로 분석한 결과이며 본 연구에서도 형상인자의 값을 484로 결정하였다.

(3) 초기손실

초기 손실 Ia는 유출 시작에 앞서 손실되는 모든 양을 포함한다. 강우의 양에 대한 0과 1사이의 일정 비율로 표시될 수 있다. XP-SWMM은 기본값으로 0.2의 비율을 사용하며 본 연구에서도 0.2의 값을 사용하였다.

3.3.3 하도망 자료 입력

XP-SWMM은 여러 형태의 관 형상을 입력할 수 있으며, 본 연구에서 모의하고자 하는 굴포천 방수로 유역은 굴포천 본류 및 방수로 구간은 자연형 하천, 도시지역은 하수관망으로 구성되어 있다. 따라서 굴포천 본류 및 방수로 구간은 단면 형상을 아래의 그림과 같이 100m 간격, 지천의 경우 50m 간격으로 입력하였다. 도시구간의 하수관망의 경우 지름 1,000mm이상의 원형관로를 중심으로 입력하였다. 다음 Fig. 3은 굴포천 유역의 하도 추적을 위해 입력한 하도망 및 관망을 보여주고 있다.

3.3.4 경계조건의 입력

굴포천 유역은 본류의 최하류인 신곡 양·배수장에서 자연 배수가 불가능할 경우 38.33cms의 용량을 지닌 펌프로 강제 배수를 하게 된다. 또한 굴포천 방수로가 건설될 경우 방수로 최하류점에 우수지 및 배수갑문을 설치하여, 조수의 역류를 차단하고 방수로의 홍수량을 배제하게 된다. 따라서 굴포천 유역의 경우 방수로 하단에서의 서해 조위, 신곡 양·배수장에서 펌프의 운영이 경계조건으로 작용하게 된다.

Table 4. CN and Concentration Time for Each Subbasin

Subbasin	CN	Tc(min.)	Subbasin	CN	Tc(min.)
Sicheon-cheon	70	98.44	Guji-cheon	88	165.96
Gyesan-cheon	70	104.75	Dongsin-cheon	95	135.35
Samjeong-cheon	95	24.16	Up stream of Gulpo-cheon	86	344.71
Youwal-cheon	88	54.22	Main stream of Gulpo-cheon	90	48.3898
Sosa-cheon	90	269.40			



Fig. 3. Sewer System of Gulpo-cheon

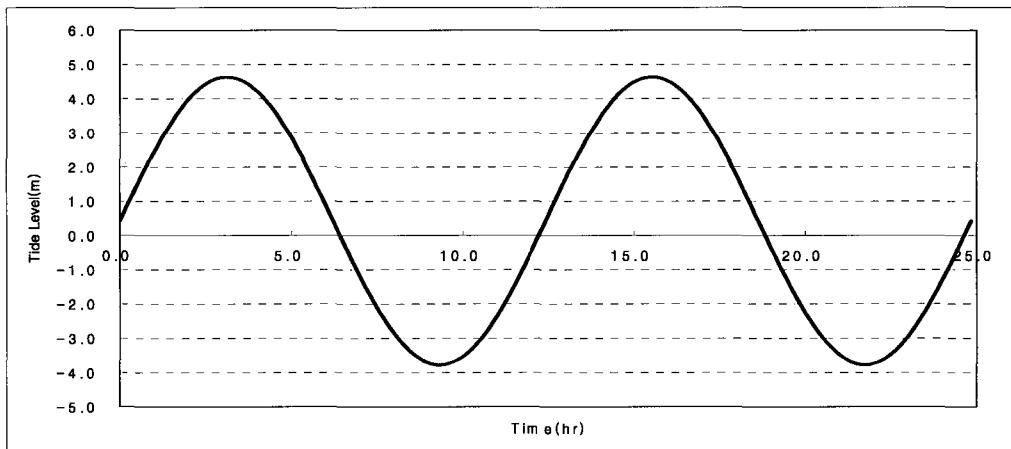


Fig. 4. Tide Level Curve of Yellow Sea

(1) 서해 조위의 입력

굴포천 방수로 유역은 하천과 연결된 방수로를 통하여 바다로 직접 방류되거나 하천 하류부에 설치된 유수지를 통하여 바다로 방류되기 때문에 바다의 조위 변화가 하천 및 하수도의 수위변화에 크게 영향을 미친다. 서해안 지역은 조석의 간만 차이가 9m에 이르는 점을 감안할 때 수치해석 시 조석의 간만차이를 반드시 고려하여야 하며, 이와 같은 조건을 외부경계조건으로 설정이 가능하다. 본 연구에서는 서해 대조평균만조위(EL. 4.63m)를 고려하여 진폭 8.406m, 주기 12시간 25분인

그림 4와 같은 정현곡선을 적용하였다. 또한 경계조건에 조수 감문을 설정하여 조수위가 굴포천 방수로 수위보다 높을 경우 굴포천의 방류를 차단할 뿐만 아니라 바닷물이 역류하는 것을 방지하였다.

(2) 신곡 양·배수장

신곡 양·배수장은 굴포천 본류 최 하류에 위치하고 있으며, 행정구역 상 경기도 김포시 고촌면 신곡리에 위치하고 있다. 평상시에는 서·동부 간선수로를 통하여 한강의 물을 공급하고 호우 시 홍수량을 배제시키는

역할을 하고 있다. 외수위인 한강의 수위가 굴포천 수위보다 낮을 경우 배수문을 작동하여 자연 배수시키며, 한강 수위가 굴포천보다 높아 자연배수가 불가능할 경우 펌프를 통하여 강제 배수 시키게 된다. 신곡 양·배수장에 설치된 펌프는 1050마력 5대로 총 5250마력, 양수량 38.33cms이다. 펌프의 작동은 펌프장 내 유수지의 수위가 4.5m 이상일 경우 모든 펌프를 작동하여 홍수량을 배제한다. 따라서 본 연구에서는 한강 홍수위가 굴포천 보다 높아 자연 배수가 불가능 할 경우 최대 홍수위를 나타낼 수 있으므로 신곡 양·배수장의 경우 수위 4.5m일 때 양수를 실시하여 홍수량을 배제시키는 것으로 경계조건을 설정하였다.

4. 적용결과

4.1 개수 전·후의 비교

본 연구에는 개수 전·후의 통수능을 비교하기 위하여 방수로 구간의 수로폭을 제외한 기타의 경계조건을 동일하게 하였다. 설계 강우량의 경우 굴포천 방수로의 설계빈도인 100년을 기준으로 하였으며, 강우의 지속시간은 방수로 확장 후의 상태에서 임계지속 시간으로 선

정 된 9시간으로 설정하였다. 다음 Table 5는 방수로 주요 지점에서의 개수 전·후의 최대 유량 및 수위를 비교한 것이다. 또한 Fig. 5는 방수로 각 구간의 만수시 유량을 비교한 것이다.

Table 5에서 지점 1001은 방수로의 분기점, 722는 연결수로의 지점이다. 이 두 지점에서의 유량 및 수위는 큰 차이를 보이지 않으나 이 후 지점들에서 유량은 큰 차이를 보인다. 방수로 연결수로가 끝나는 지점 이후 개수전 상태에서 유량이 급격하게 감소하는 것이다. 이것은 굴포천 유역에서 유출되는 홍수량이 감소하는 것을 의미하는 것이 아니라 XP-SWMM 모형의 기본적인 특성에 의한 것이다. XP-SWMM의 경우 개수로 또는 관망에서 월류 한 유량을 하도 추적에서 제외시키게 된다. 즉, 유역의 전체 유출량은 변함이 없으나 하천을 통해 흐르는 유량의 감소를 의미한다. 본 연구에서 이러한 결과가 나타난 것은 현재 방수로의 연결수로의 경우 폭 80m로 개수 되어 있는 반면 방수로 본류 구간은 아직 미개수 상태인 폭 20m로 운영하기 때문에 유출량이 개수구간에서 미개수 구간으로 이동하면서 하천 단면적의 차이에 의해 통수능이 급격하게 저하되어 유량이 지체 되면서 월류가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 5. Comparison of Maximum Discharge and Highest Water Level of Major point of Floodway

Point	Max. Discharge (cms)		Highest Water Level (m)	
	Before	After	Before	After
1001 (Bifurcation Point)	1332.438	1418.391	6.593	6.632
722 (Start Point of Connecting Channel))	1488.008	1529.912	6.593	6.625
540 (Gulhyen Bridge)	453.361	1215.729	6.306	5.809
375	418.608	1218.161	5.604	5.327
265 (Sicheon Bridge)	460.316	1266.646	4.963	5.026
220	457.278	1279.904	4.714	4.747
75	455.438	1265.525	4.648	6.437
0 (Entrance of Yellow Sea Detention Reservoir)	461.788	1266.987	4.634	4.631

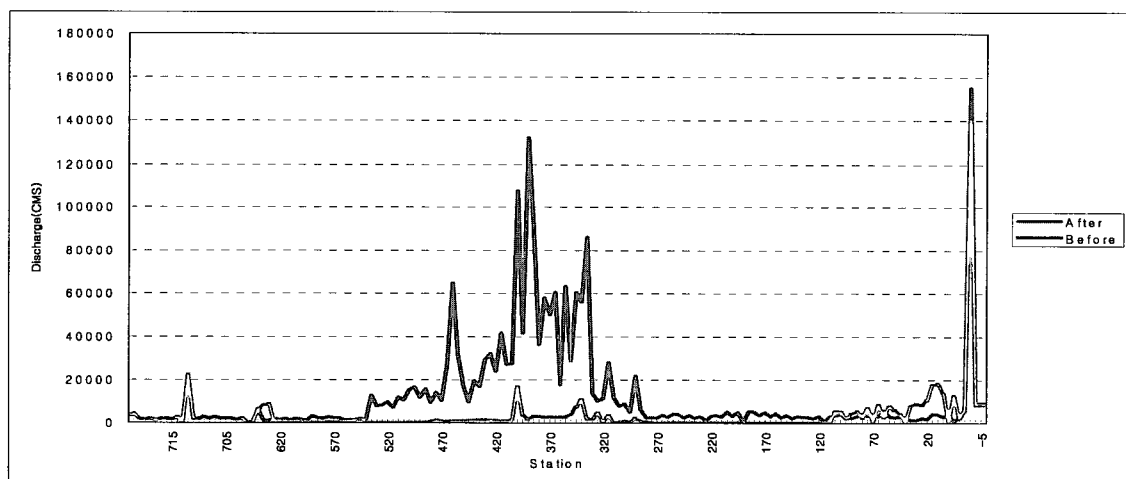


Fig. 5. Maximum Conveyance at Each Reach Point

Fig. 5를 보면 방수로의 연결수로와 서해 유수지 부분에서는 개수전과 개수후의 차이가 거의 없었다. 그러나 본류 구간에서는 개수후가 개수 전보다 더 큰 값을 나타내었다. 즉, 방수로의 각각의 지점구간을 흐를 수 있는 유량이 증가하는 것이다. 또한 연결수로에서 통수 가능한 유량이 비슷하였으나, 연결수로가 끝난 후 통수 가능 유량은 개수후의 경우가 훨씬 크게 나타났다. 따라서 개수전 상태에서 연결수로에서 방수로로 유량의 이동이 지체됨에 따라 연결수로 구간에서 월류 현상이 발생하는 것으로 모의 되었다. 이에 따라 방수로 연결수로 이후의 지점에서 위에서 언급한 것과 같은 XP-SWMM의 특성에 의하여 방수로의 주요구간에서 개수전 상태의 유량이 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 모의 결과 각각의 주요 지점에서의 수위는 큰 차이를 보이지 않았다. 오히려 개수전의 현재 상태에서 고수위가 지속되는 것을 발견 할 수 있었다. 방수로를 통해서 흐르는 유량만을 고려하여 비교한다면, 개수전인 현상에서 개수후의 상태보다 약 1/3가량 적은 유량임에도 불구하고 비슷하거나 더 높은 수위를 나타낸다는 것이다. 이는 개수전과 개수후의 방수로 통과 유량의 차이만큼의 홍수소통능력 증가 효과가 있음을 나타낸다고 할 수 있다.

또한 현상에서 발생할 것으로 모의 된 월류는 연결수로 구간에서 제방의 붕괴 등의 다른 위험성을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 굴포천 방수로의 확장 시 굴포천 연결수로에서의 제방 붕괴, 월류 등의 재해를 예방 할 수 있으며, 현재의 경우보다 방수로 구간의 수위가 낮아짐에 따라 방수로의 통수능 향상과 함께 안정적인 홍수량 배제가 가능해진다는 결론을 얻을 수 있다.

4.2 방수로 분기점 조건에 따른 영향

4.2.1 방수로 분기점 상·하류에서의 유량비교

굴포천 방수로는 굴포천 상류 지역에서 유출되는 유출량을 서해바다로 직접 배출하여 기존의 신곡 양·배수장에만 의존하였던 홍수 배제 능력을 향상시켜 유역의 침수피해를 줄이는 것이 건설 목적이다. 이에 따라 본 연구에서는 굴포천 본류와 방수로의 분기점에서 유량 분배의 영향에 대하여 모의를 실시하였다. 본 연구에서는 굴포천 상류의 유출량을 자연 배제 시킬 경우와 상류의 유출량 전량을 방수로로 배제시킬 경우의 두 가지로 구분하여 모의 하였다.

방수로와 굴포천 본류의 분기점에서 유량의 분배 조건에 따른 방수로 구간의 유량 및 수위를 비교한 결과 굴포천 상류의 유출량을 전부 방수로로 배제할 경우가 자연 분류 시킬 때보다 더 적은 유량과 낮은 수위를 보

였다. 특히 이러한 차이는 방수로 연결수로 구간에서 크게 나타났으며, 하류로 갈수록 영향이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이는 자연 분류식의 경우 굴포천 하류인 신곡 양·배수장 방향에서 최대 약 300cms의 유량이 방수로 구간으로 역류하기 때문인 것으로 밝혀졌다. 이것은 Fig. 7을 확인하면 보다 확실하게 알 수 있다. Fig. 6은 방수로 분기점 상류 지점 1001, 연결수로 시점 722, 신곡 양·배수장 방향 지점 SK 27의 하천망을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 나타나듯이 상류 지점인 1001보다 연결수로 지점인 722에서 높은 유량이 나타났다. SK 27의 경우 유량이 음수로 표시되었는데 이것은 유속이 음수(-)인 경우로 이 구간에서의 흐름이 역방향임을 뜻한다. 즉, Fig. 7에서 보여주듯이 지점 722에서 지점 1001보다 높게 나타난 유량이 SK 27에서 역류한 유량의 양과 거의 동일함을 알 수 있다.

따라서, 굴포천 방수로의 안정적 운영을 위해서는 위에서 확인 된 것과 같은 역류를 차단하여야 할 것이다. 즉, 본류와 방수로 분기점에 우수 갑문을 설치하여 굴포천 상류의 유출량을 전량 방수로로 배제하는 것이 방수로의 운영에 보다 안정적인 것으로 나타났다.

4.2.2 신곡 양·배수장 펌프 운영 시간 비교

앞 절에서 언급한 바와 같이 배수장 펌프의 작동은 펌프장 내 유수지의 수위가 4.5m 이상일 경우 모든 펌프를 작동하여 홍수량을 배제하기 때문에 분기점에서의 홍수량 분류 방법에 따라 다음 Figs 8 and 9와 같은 펌프 운영 곡선이 나타났다.

Fig. 8과 9를 통해 알 수 있듯이 분기점에서 우수 갑문을 설치하여 분류를 차단할 경우, 배수장에서 고수위가 자연유하식보다 더 오랫동안 유지되었다. 결과적으로 펌프의 운영시간이 자연유하식보다 약 9시간 증가하였다. 이러한 원인은 자연유하식의 경우 서부 간선수로를 통하여 펌프장으로 유입된 유량과 분기점 하류의 유량

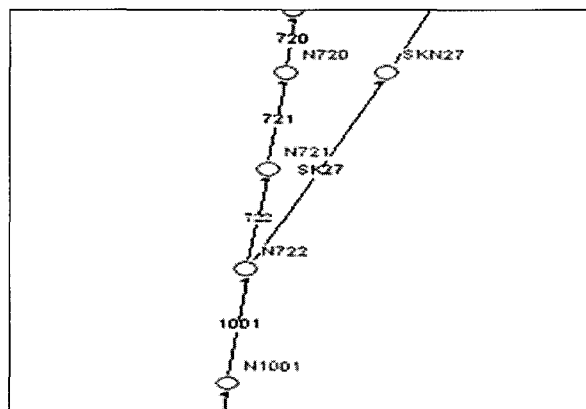


Fig. 6. Stream Network of Bifurcation Point

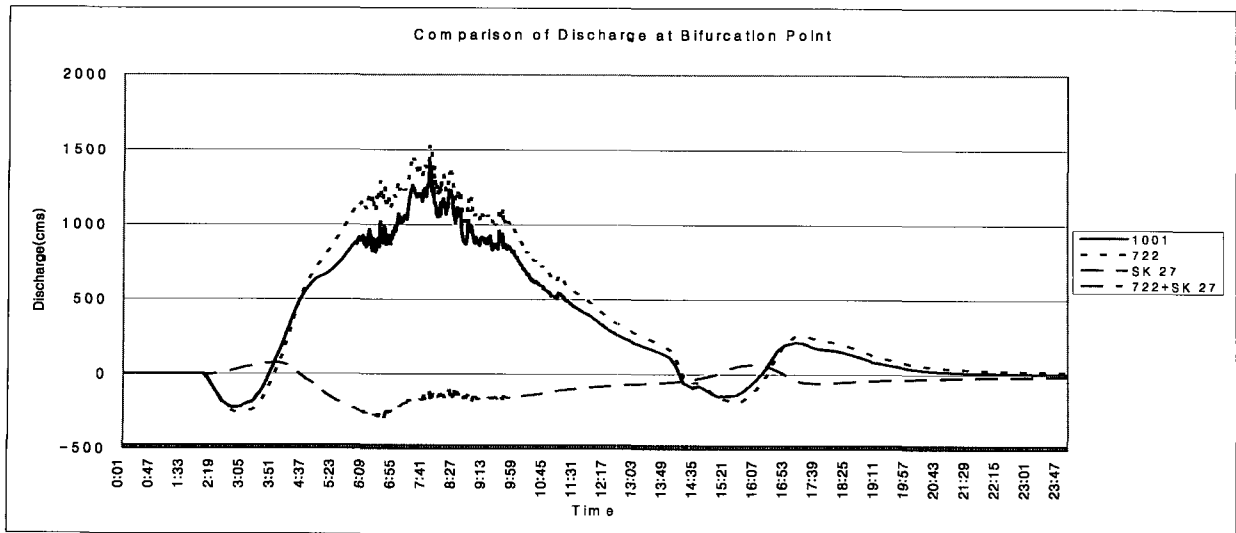


Fig. 7. Comparison of Discharge at Bifurcation Point

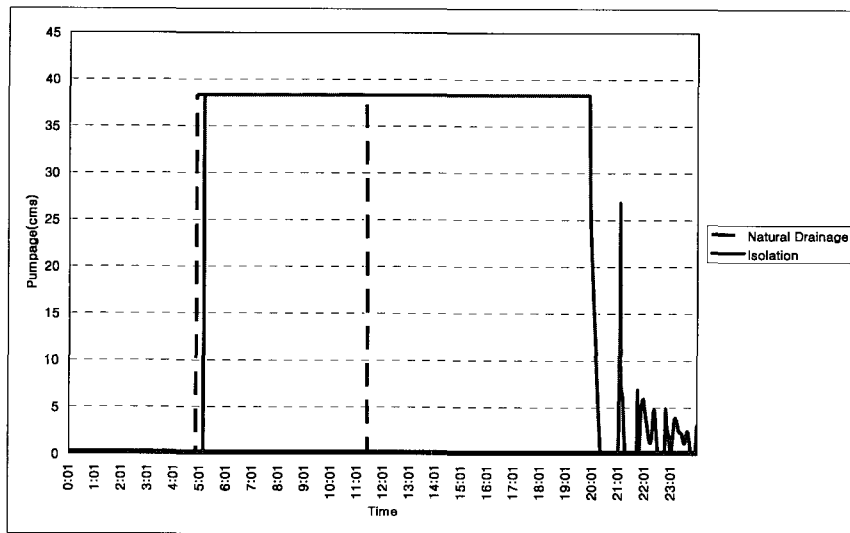


Fig. 8. Pumpage Curve at Singok Pump Station

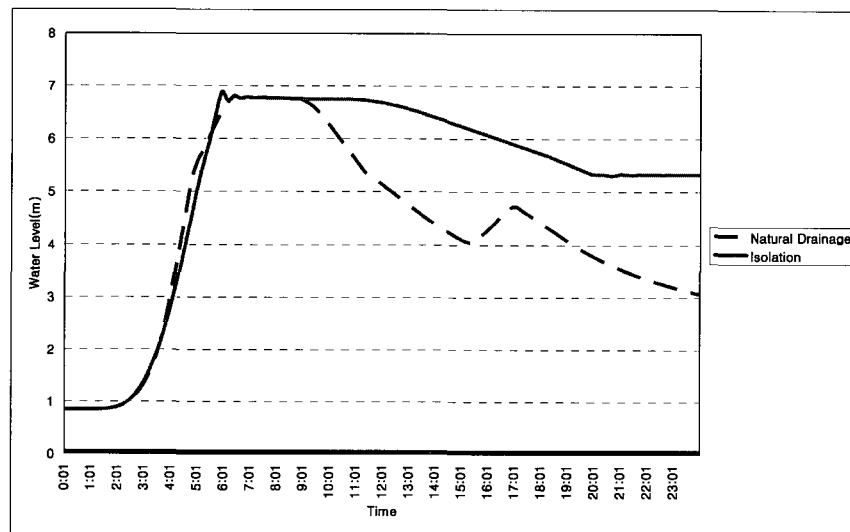


Fig. 9. Water Level at Singok Pump Station

이 방수로 방향으로 역류하여 연결수로로 유입됨으로써 분류점 이하의 수위 및 유량 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 분기점에 우수갑문을 설치하여 역류를 차단할 경우 서부 간선수로로 통하여 유출되는 계산, 작전, 효성 지역의 우수가 모두 신곡 양·배수장을 통하여 배출되어야 하기 때문에 신곡 양·배수장의 부하량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 펌프의 용량에 따라 유수지에 지체되는 홍수량이 증가하여 펌프장에서의 고수위가 자연유하식의 경우보다 오랫동안 유지된다.

5. 결 론

본 연구에서는 XP-SWMM을 이용하여 굴포천을 대상유역으로 방수로 확장 전·후의 상태와 방수로 확장 후, 굴포천 본류와 방수로 분기점에 우수갑문을 설치하여 유량을 자연유하시키는 경우와 우수갑문을 차단하여 굴포천 상류의 홍수량 전량을 방수로로 배제시킬 경우로 구분하여 분석을 실시하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 인천지방의 기왕의 강우 자료를 분석하여 확률 강우량을 산정한 결과 Gumbel 분포형으로 결정하였다. 본 연구에서 산정한 확률강우량은 기존의 보고서들에 비하여 다소 크게 나타났으나, 최근 들어 강우의 최대치가 커지고 있는 상황을 잘 반영한 것으로 판단된다.
- (2) 동일한 강우와 경계조건(서해조위)에 대하여 개수 전·후의 방수로 구간에서의 수위 및 유량을 비교하였다. 이때 개수전(현재 상태)에서는 방수로로 연결수로 구간에서 제방 월류가 발생하는 것으로 모의 되었다. 또한 개수전의 경우 홍수량의 일부가 연결수로 구간에서 월류하여 방수로 본 구간을 통과하는 홍수량이 감소하였음에도 불구하고 개수후와 수위에서 큰 차이를 보이지 않거나 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 방수로 확장 시 연결수로에서 발생할 수 있는 제방 월류를 통한 인근지역의 침수피해를 예방할 수 있음과 동시에 방수로 본구간에서의 홍수 소통능력 또한 향상되는 것을 의미한다고 할 수 있다.
- (3) 개수후의 상황에서 방수로와 굴포천 본류의 분류 조건에 따른 수위 및 유량을 모의한 결과 자연 분류의 경우 신곡 양·배수장 방향의 굴포천 본류의 하류 방향에서 방수로로의 역류가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 안정적인 방수로 운영

을 위해서는 분기점에 배수 갑문 등의 설치를 통한 역류의 차단이 필요함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 교내 연구의 일환으로 수행되었으며, 이를 지원해주신 인하대학교 당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강금석 (1995). 지리정보시스템을 결합한 SWMM, 석사학위논문, 서울대학교
- 건설교통부 (2000). 1999년도 수자원관리기법개발 연구 조사보고서 제 2권 한국 가능최대강수량 추정 별책 2권 지역적 설계강우의 시간적 분포
- 건설교통부 (2002). 굴포천유역 홍수피해 현황
- 건설교통부, 한국수자원공사 (1995). 굴포천 방수로 및 부대시설공사 추가 실시 설계
- 건설부 (1988). 굴포천 치수종합대책조사 보고서
- 건설부, 한국수자원공사 (1991). 경인운하 타당성 조사 및 굴포천 종합치수사업 기본계획
- 건설부, 한국수자원공사 (1993). 경인운하 보완조사
- 김충수 (2002). 도시유출 모의모형의 매개변수 추정, 석사학위논문, 서울대학교
- 안상진, 김진국 (1999). “도시유출모형을 이용한 도시유역의 유출분석”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제 4호, pp. 479 ~ 488
- 이종태, 강태호, 김정환 (1996). 도시유역에서의 배수계통 설계를 위한 SWMM 모형, 제 4회 수공학 WORK-SHOP 교재, 한국수자원학회
- 이종태 (1998). “도시유역에서의 유출 및 수질해석 모형”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 31권, 제6호, pp. 709~725
- 이준우, 김성준 (2001). “간척담수호 유역의 비점오염 추정을 위한 SWMM의 적용 -홍보간척지구-”, 2001년 한국수자원학회 학술발표회 논문집 (III), 한국수자원학회, pp. 826 ~ 832
- 인천광역시 (1998). 굴포천 및 청천천 복개 공사에 따른 수리학적 검토 용역
- 한국수자원공사 (1997). 경인운하의 안정적 주운을 위한 수리·수문학적 분석연구
- 한국수자원공사 (1996). 경인운하건설사업 기본계획 및 기본설계 보고서
- 허준행 (2004). FARD(Frequency Analysis of Rainfall Data)를 이용한 강우 통계 분석, 제 12회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회
- Campbell, C. W., Sullivan, M. S. (2002). “Simulating

- time-varying cave flow and water levels using the Storm Water Management Model”, *Engineering Geology*, 65, pp. 133 ~ 139
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., (1992). *Storm Water Management Model Version 4 : User’s Manual*, EPA
- Hsu, M. H., Chen, S. H., Chang, T. J., (2000). “Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system”, *Journal of Hydrology*, 234, pp. 21 ~ 37
- Maitland, D., Phillips, B. C., Goyen, A. G., Thompson, G. R. (1999). “Integrated Modeling of Urban Drainage Systems using XP-SWMM32 ”, *8th International Conference on Urban Storm Drainage (8ICUSD)*, Sydney, Australia, pp. 1887 ~ 1895
- U.S. Soil Conservation Service (1972). *Section 4, Hydrology, SCS National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, U.S. Govt. Printing Office, Washington DC
- Walesh, S. (1989). *Urban Surface Water Management*, A Wiley-Interscience Publication, New York
- XP Software (2004). *XP-SWMM2000 User’s Manual*
- Zaghloul, N. A., Abu Kiefa, M. A., (2001). “Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulation”, *Advanced in Engineering Software*, 32, pp. 587 ~ 595
- (논문번호:05-74/접수:2005.05.27/심사완료:2005.12.05)