

설계홍수량 산정을 위한 이동강우 적용에 관한 연구

A Study on Design Flood Analysis Using Moving Storms

오 경 두* / 이 순 철** / 안 원 식*** / 류 영 훈**** / 이 준 학*****

Oh, Kyoung-Doo / Lee, Soon-Cheol / Ahn, Won-Sik / Ryu, Young-Hoon / Lee, Joon-Hak

Abstract

One of the most difficult problems in estimating design floods is how to determine design storms. More specifically, the design storm problems turn into how to determine temporal and spatial distribution of the storm. In this study, Thiessen-Weighted Block-type(TWBK) moving storms are suggested to resolve the design storm problems and their applicability is investigated. These moving storms are applied for 100-year 48-hour design flood estimation in Han river basin using a physics-based distributed rainfall-runoff model. Simulated floods from moving storms are compared with frequency-based ones estimated from observed floods.

Keywords : Design floods, Design storms, TWBK moving storms, distributed model

요 지

설계홍수량산정과 관련하여 국내 실무에서 어려움을 겪는 가장 큰 문제 중 하나는 설계강우의 결정이다. 설계강우와 관련된 문제는 보다 세부적으로 살펴보면 강우의 시간분포와 강우의 공간분포 결정 문제로 집약될 수 있다. 본 연구에서는 강우의 시간분포와 공간분포에 관련된 문제를 해결할 수 있는 방법으로 티센가중치를 반영한 교호블록형 이동강우(TWBK moving storms)에 의한 설계홍수량 산정기법을 제안하고 그 적용성을 검토하였다. 100년 빈도 48시간 이동강우를 한강유역에 적용하여 그 결과를 기존 연구에서 홍수위 실측자료로부터 빈도해석에 의해 구한 홍수량과 비교하여 적용성을 입증하였다.

핵심용어 : 설계홍수량, 설계강우, TWBK 이동강우, 분포형 모형

* 교신저자, 육군사관학교 건설환경학과 교수
Corresponding Author, Professor, Department of Construction Engineering & Environmental Sciences, Korea Military Academy, Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-799, Korea
(e-mail: okd0629@kma.ac.kr)

** 수원대학교 토목공학과 박사과정
Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Suwon, San 2-2, Wawoo-ri, Bongdam-myon, Hwasung-gun, Suwon City, 445-743, Korea

*** 수원대학교 토목공학과 교수
Professor, Department of Civil Engineering, University of Suwon, San 2-2, Wawoo-ri, Bongdam-myon, Hwasung-gun, Suwon City, 445-743, Korea

**** 수원대학교 토목공학과 박사과정
Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Suwon, San 2-2, Wawoo-ri, Bongdam-myon, Hwasung-gun, Suwon City, 445-743, Korea

***** 육군사관학교 건설환경학과 전임강사
Instructor, Department of Construction Engineering & Environmental Sciences, Korea Military Academy, Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-799, Korea

1. 서 론

얼마전까지 우리나라의 치수정책은 하천의 주요 지점별로 해당 빈도의 홍수량을 산정하여 계획홍수량을 결정하고 이에 따라 하도를 개선하거나 제방을 축조하는 하도 중심의 “선적(線的)치수계획”이었으며, 하도를 따라 홍수량 산정지점별로 각각 홍수량을 산정하여 적용하였다. 그러나 유역종합치수계획이나 홍수량할당과 같은 미래지향적인 치수정책들은 상류 지역의 토지이용 변화나 침투저류시설의 설치 등 유역관리가 피해중심지역(damage center)이 포함된 하류 지역에 어떻게 영향을 미치는지 상하류를 일관하는 정량적인 분석을 바탕으로 유역단위의 “면적(面的) 치수계획”을 수립하는 방향으로 나아가고 있다. 즉, 물줄기가 같은 유역 단위로 상류에서부터 유역 출구점까지 강우 사상으로부터 발생한 지표면 유출이 하도 유출을 형성하여 흘러나가는 일련의 과정을 일관성 있게 분석하여 치수계획을 수립하도록 요청받고 있다(건설교통부, 2007).

그러나 이것은 지금까지 적용해 온 설계강우 결정방법으로는 불가능하다. 국내 실무에서 적용하고 있는 설계강우는 강우의 시간적인 분포모형으로 대부분 Huff 분포를 채택하고 있으며, 공간적으로는 설계강우가 적용될 전체 집수구역에 대해 균일한 강도의 고정강우를 채택하고 있다. 강우량의 공간적인 변화를 반영하는 방법으로 집수면적의 변화에 따른 면적우량감소계수(Areal Reduction Factor)를 적용하고 있다. 면적우량감소계수는 집수면적의 변화에 따른 강우량의 변화는 반영할 수 있으나 집수구역 내의 불균일한 강우 분포는 반영할 수 없다. 그리고 면적우량감소계수가 집수면적에 따라 달라지게 되므로 홍수량 산정지점별로 면적우량감소계수를 적용해야 하며 이에 따라 홍수량 산정지점별로 설계강우가 달라질 수 밖에 없다.

Huff 분포는 임의지속기간을 갖는 다수의 강우사상을 무차원시간(%)-무차원강우량(%) 관계로 표현하여 최대강우강도가 발생하게 되는 위치를 4분위로 구분한 후 해당 분위에 속하는 무차원시간-무차원강우량 관계 곡선을 발생 빈도별로 제시한 것으로서 근래에 우리나라에서 널리 채택되고 있다. 그러나 배덕효 등(2004)에 의하면 분위의 선택에 따라 최대 강우강도가 2배 가까이 달라지는 것으로 나타났다. 윤용남 등(2004)은 채택된 분위에 따라 홍수량의 차이가 크게 발생할 뿐만 아니라 어느 분위기를 채택해야 하는지에 대한 명확한 기준이 없음을 지적하였다. 오경두(2009)는 Huff 분포로 구한 임의 지속기간에 대한 누적최대강우량이 IDF 곡선으로부터 구한 확률강우량과 달라질 뿐만 아니라 분위

선택에 따라라도 달라지는 것을 지적하였다. 본 연구에서는 국내 실무에 적용되고 있는 설계강우 결정방법의 문제점을 해결하기 위하여 이동강우의 도입 방안을 검토하였다. 본 연구에서 제안한 이동강우의 실제 유역에 대한 적용성을 확인하기 위하여 VfloTM모형으로 한강유역의 홍수량을 산정하고 그 결과를 검토하였다.

2. 이동강우에 대한 연구동향

Maksimov (1964)는 강우의 이동이 침투홍수량의 변화에 영향을 준다는 사실을 발견하였으며, Marcus (1964)는 강우의 이동이 지표면 유출의 시간 분포를 결정하는 중요한 요소가 된다는 사실을 실험적으로 제시하였다. Yen and Chow(1968)는 이동강우로 인한 지표면 유출 실험을 수행하였다. Roberts and Kingman (1970)은 강우의 이동방향이 침투홍수량을 변화시킬 수 있으며 홍수수문곡선의 감쇄부에 영향을 미친다는 사실을 발견하였다. Surkan (1974)은 실측자료를 통하여 강우의 이동방향과 속도가 침투홍수량과 평균유출율에 가장 민감하게 영향을 미친다는 사실을 발견하였다. Sargent (1981, 1982)는 강우의 이동방향과 속도가 침투홍수량, 유출총량, 홍수수문곡선의 형태에 미치는 영향을 검토하였다. Niemczynowicz (1984a,b)는 강우의 이동방향과 속도, 강우강도, 지속기간이 침투홍수량과 홍수수문곡선에 미치는 영향을 분석하고 가상의 유역과 스웨덴 Lund시에 적용하였다. Jensen (1984)은 강우의 이동과 방향이 침투홍수량, 침투홍수량 도달시간, 홍수수문곡선의 형태 등에 미치는 영향을 분석하였다. Foroud *et al.* (1984)은 50년 빈도의 이동강우에 대하여 이동방향과 속도가 홍수수문곡선에 미치는 영향을 분석하였다. Singh (1998)은 가상 평면 유역상에서 강우의 이동방향에 따른 영향을 운동과 방정식을 적용하여 해석적으로 분석하였다. Hoblit *et al.* (2004)은 레이더 호우자료를 분석하여 미국 St. Louis시의 이동설계강우를 개발하였다. TITAN 호우 추적 프로그램으로 분석한 레이더 자료를 지상 관측소의 강우자료로 보정하여 이동설계강우를 개발하였으나 IDF 곡선에서 산정한 설계강우량 보다 과대하게 산정되는 문제점이 있었다.

국내에서는 이재형 등(1990)이 금강유역에서 관측된 주요 호우의 이동방향과 속도에 대하여 분석하였다. 최계운 등(1993)은 미국 아이다호주 실험유역에서 관측된 실측 호우를 대상으로 분포형 강우 유출 모형을 적용하여 홍수량을 산정하였다. 최계운 등(2000)은 실측 호우의 등우선도로부터 작성된 이동강우를 복하천 유역을 대상으로 적용하여 강우의 이동방향과 속도에 따른 침

두홍수량의 변화를 분석하였다. 한건연 등(2004)은 가상 유역에 대하여 이동강우의 시간분포와 이동방향, 이동 속도에 따른 침투홍수량, 침투홍수량 도달시간, 홍수수문곡선의 형태를 분석하였다. 조용수 등(2005)은 가상의 유역을 대상으로 유역형상과 이동강우의 시간분포와 이동방향, 이동속도에 따른 침투홍수량과 침투홍수량 발생시간을 분석하였다.

지금까지 이동강우와 관련한 국내외 연구동향을 살펴본 결과 주로 이동강우의 시간분포, 이동방향과 속도가 침투홍수량, 침투홍수량 발생시간, 유출총량, 홍수수문곡선의 형태 등에 미치는 영향에 대하여 연구가 이루어졌으며, 연구 방법으로는 관측을 포함한 실험적인 방법과 해석적인 방법이 모두 적용되고 있었다. 또한 유역특성을 고려하여 유역형상에 따른 이동강우의 영향을 분석한 연구가 이루어졌으나 기하학적으로 단순한 형태의 가상 유역을 대상으로 분석하는 정도에 머무르고 있었다. 지금까지 이루어진 대부분의 이동강우와 관련한 연구는 가상 유역이나 중소규모 유역을 대상으로 가상적인 이동강우나 실측 이동강우를 적용하여 홍수수문곡선의 특성을 비교분석하는 수준에 머무르고 있었다. 최근에 실측 호우를 분석하여 이동설계강우를 개발하려는 시도가 있었으나 실무 적용 수준에는 이르지 못한 것으로 나타났다.

3. TWBK 이동강우의 작성

3.1 이동강우의 기본 전제 조건

본 연구에서 제시한 TWBK (Thiessen-Weighted BlockKing-type) 이동강우의 설정에 있어서 다음과 같은 네 가지 사항을 가정하기로 한다.

- 1) 강우시작시점부터 종료시점까지 일정한 방향으로 진행한다. 실제 호우는 이동방향이 매우 불규칙하고 복잡하나 큰 피해를 유발하는 주요 호우사상에 대해서는 일정한 패턴을 발견할 수 있다. 예를 들어 우리나라의 여름철 저기압기단은 대부분 서에서 동으로 이동하며, 태풍에 수반되는 호우는 주로 남에서 북 또는 남서에서 북동 방향으로 이동한다.
- 2) 강우시작시점부터 종료시점까지 일정한 속도로 이동한다. 실제 호우는 호우사상별로 이동속도가 다를 뿐만 아니라 동일한 호우사상이라 하더라도 시간이 경과함에 따라 이동속도가 변하게 된다. 그러나 수문분석의 간편성과 일관성을 유지하기 위해서 강우의 이동속도가 일정한 것으로 가정한다.

3) 임의 지점의 임의 지속기간 누적최대강우량은 IDF 곡선에서 구한 그 지점의 해당 지속기간에 대한 확률강우량과 일치하여야 한다. 이 전제 조건을 만족시키는 강우의 시간분포형은 교호 블록형이 유일함은 배덕호 등(2004)이 밝힌 바 있다. McCuen(1989)은 교호블록형 시간분포가 임의 지속기간에 대한 임계호우를 내포하게 됨을 밝히고 있다. 공간적으로 임의 지점에 대하여 이동강우의 확률강우량이 해당 지점의 확률강우량과 같도록 티센법 등에 의하여 유역의 강우 특성을 이동강우에 반영해주어야 한다.

4) 유역 내의 모든 지점을 포함할 수 있어야 한다. 이동강우가 지나가는 경로상에 유역 내의 모든 점이 포함되도록 이동강우의 작성 범위를 결정해야 한다.

3.2 TWBK 이동강우의 작성 절차

본 연구에서 제시한 TWBK 이동강우의 작성절차는 Fig. 1과 같다.

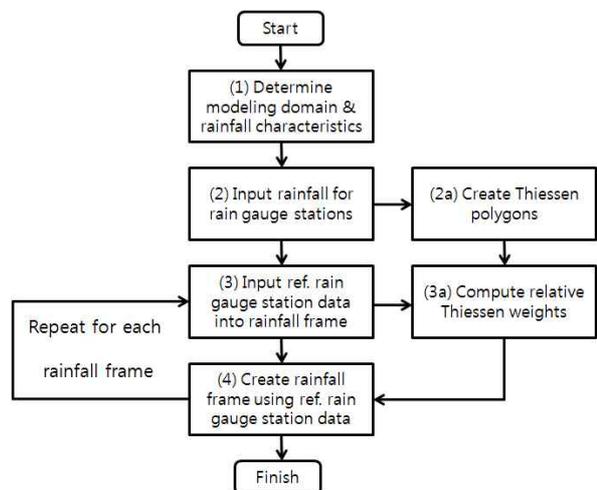


Fig. 1. Procedure for Creating TWBK Moving Storms

한강유역에 대한 이동강우 작성 사례를 예로 들어 각 단계별로 작성과정을 기술하기로 한다. 본 논문에서는 ArcView 3.2를 이용하여 작성하였으나 다른 버전이나 프로그램을 이용하여 작성할 수도 있다.

1) 이동강우 작성 영역 및 강우특성 결정

분석할 대상 유역이 모두 포함되도록 직사각형 영역 $B \times L$ 을 결정한다. 그리고 적용할 확률강우량의 특성 즉, 재현기간 r 과 강우지속기간 t 를 결정한다. Fig. 2와 같이 본 연구에서는 이동강우 모의영역으로 가로 240km, 세로 324km의 직사각형 영역을 설정하였다.

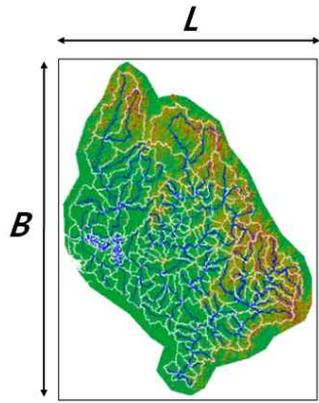


Fig. 2. Modeling Domain

본 논문에서는 한강유역 종합치수계획 수립연구(국토해양부, 2008)의 연구 결과를 고려하여 한강유역의 임계지속시간에 해당하는 48시간 지속강우를 선택하였고 홍수량산정 결과를 타 연구와 비교하기 위하여 100년 빈도 확률강우량을 선정하였으나 분석목적에 따라 다르게 정할 수 있다.

2) 우량관측소별 확률강우량 입력

유역 내 우량관측소 P_s ($s=1,2,\dots,p$)별로 재현기간 r , 지속시간 t 의 확률강우사상에 대한 강우총량 x_s 를 입력한다. Table 1은 본 연구에 포함시킨 한강유역 내의 우량관측소들에 대한 위치와 관측 개시일 등을 나타낸 것이다.

Table 1. Selected Rain Gauge Stations in Han River Basin

No.	Station	Type	Agency	Location	Elevation (EL. m)	Recording since
1	Chulwon	Auto	KMA	강원.철원.갈말.군단 964-2	152.4	1988-01-01
2	Seoul	Auto	KMA	서울.종로.송월1	85.5	1907-07-07
3	Chunchun	Auto	KMA	강원.춘천.우두 406-1	76.8	1966-01-01
4	Wonju	Auto	KMA	강원.원주.명륜1 218	149.8	1971-09-01
5	Hongchun	Auto	KMA	강원.홍천.홍천.연봉 466-9	140.6	1971-07-01
6	Yangpyung	Auto	KMA	경기.양평.양평.양근. 192-25	49	1971-02-01
7	Ichun	Auto	KMA	경기.이천.부발.신하3 287-5	68.5	1971-07-01
8	Injae	Auto	KMA	강원.인제.인제.남북 426-1	198.6	1971-09-01
9	Jaechun	Auto	KMA	충북.제천.신월 348	264.4	1971-01-01
10	Chungju	Auto	KMA	충북.충주.안림 521-5	69.4	1971-01-01
11	Daekwanryong	Auto	KMA	강원.평창.도암.횡계3 신1-133	842.5	1971-07-11
12	Anyang	T/M	MOHMA	경기.안양.만안.박달 충훈교	27	1984-04-01
13	Guro	T/M	MOHMA	서울.구로.구로본 435 구로구청	35	1984-04-01
14	Eijungboo	T/M	MOHMA	경기.의정부.의정부2 중앙초교	42	1916-01-01
15	Toegyewon	T/M	MOHMA	경기.남양주.별내.퇴계원 진관교	31	1984-04-01
16	Sungnam	T/M	MOHMA	경기.성남.수정.북정 대곡교	24	1984-04-01
17	Naksang	T/M	MOHMA	경기.성남.분당.운중 정신문화연구원	40	1962-07-01
18	Namhansansung	Auto	MOHMA	경기.광주.중부.산성 373 남한산초교	20	1962-07-01
19	Yongin1	T/M	MOHMA	경기.용인.역북 농촌지도소	87	1974-07-04
20	Chungpyung	T/M	MOHMA	경기.가평.외서.대성	36	1974-07-01
21	Hamyon	Auto	MOHMA	경기.가평.하면.현 하면사무소	117	1960-07-01
22	Seomyon	T/M	MOHMA	강원.홍천.서.반곡 반곡교	130	1966-09-01
23	Naechon	T/M	MOHMA	강원.홍천.내촌.도관 내촌농고	150	1963-05-01
24	Seosuk	Auto	MOHMA	강원.홍천.서석.풍암 서석면사무소	320	1960-08-01

Table 1. Selected Rain Gauge Stations in Han River Basin (Continued)

No.	Station	Type	Agency	Location	Elevation (EL. m)	Recording since
25	Gapyung2	T/M	MOHMA	경기.가평.가평.읍내 557 가평초교	60	1915-01-01
26	Chuyang	T/M	KOWACO	강원.춘천.북산.추곡 562 추곡초교	210	1972-08-11
27	Boopyung	Auto	MOHMA	강원.인제.남.신남 404 신남중교	250	1962-07-01
28	Hyunri	T/M	KOWACO	강원.인제.기린.현 46-2	320	1972-08-11
29	Changchon	T/M	KOWACO	강원.홍천.내.창촌 1733-1	620	1972-08-11
30	Wontong	T/M	KOWACO	강원.인제.북.한계 1044 한계초교	320	1972-08-11
31	Seohwa	T/M	KOWACO	강원.인제.서화.서화 1242 서성초교	330	1972-08-11
32	Sanae	Auto	MOHMA	강원.화천.사내.사창5 사내초교	260	1962-09-01
33	Sangseo	Auto	MOHMA	강원.화천.상서.다목 508 다목초교	420	1962-07-01
34	Hwachundam	T/M	MOHMA	강원.화천.간동.구만 화천발전소내	180	1974-07-01
35	Bangsan	Auto	MOHMA	강원.양구.방산.현 50 방산초교	350	1962-07-01
36	Chungwoon	T/M	MOHMA	경기.양평.청운.용두 청운면사무소	110	1964-07-01
37	Yeoju	T/M	MOHMA	경기.여주.여주.상	45	1962-07-01
38	Sanguk	T/M	MOHMA	충북.음성.생극.신양 생극면사무소	100	1965-11-01
39	Moonmack	T/M	MOHMA	강원.원주.문막.문막 문막교	65	1980-06-01
40	Ganhyun	T/M	MOHMA	강원.원주.지정.간현 지정면사무소	70	1966-09-01
41	Hweongsung	T/M	MOHMA	강원.횡성.횡성.읍하 58-1 횡성군청	130	1916-07-01
42	Chungil	T/M	MOHMA	강원.횡성.청일.유동 청일면사무소	85	1962-07-01
43	Booron	T/M	MOHMA	강원.원주.부론.범천 부론면사무소	80	1962-07-01
44	Mockgae	Auto	MOHMA	충북.충주.엄정.용산 엄정면사무소	80	1962-07-01
45	Goesan	T/M	KOWACO	충북.괴산.소수.고마	110	1985-08-30
46	Seokrisan	Auto	MOHMA	충북.보은.내속리.상관 법주분교	330	1973-01-01
47	Backwoon	T/M	KOWACO	충북.제천.백운.평동	220	1985-08-30
48	Chungpoong	T/M	KOWACO	충북.제천.청풍.물태	180	1985-08-30
49	Danyang	T/M	KOWACO	충북.단양.적성.하방	220	1985-08-30
50	Sangdong	T/M	KOWACO	강원.영월.하동.주문 166-3	540	1985-08-30
51	Yeongwalll	T/M	KOWACO	강원.영월.남.북상	200	1985-08-30
52	Soojoo	T/M	KOWACO	강원.영월.수주.무능	270	1985-08-30
53	Pyungchang	T/M	KOWACO	강원.평창.평창.후평	295	1985-08-30
54	Jeongsun	Auto	MOHMA	강원.정선.정선.봉영3 정선군청	300	1916-07-01
55	Jinboo	T/M	KOWACO	강원.평창.진부.상진부	480	1985-08-30
56	Imgae	T/M	KOWACO	강원.정선.임계.송계1	400	1985-08-30

주) 자료출처: 한강홍수통제소 국가수자원관리종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr/>)

MOHMA: 국토해양부, KMA: 기상청, KOWACO: 한국수자원공사

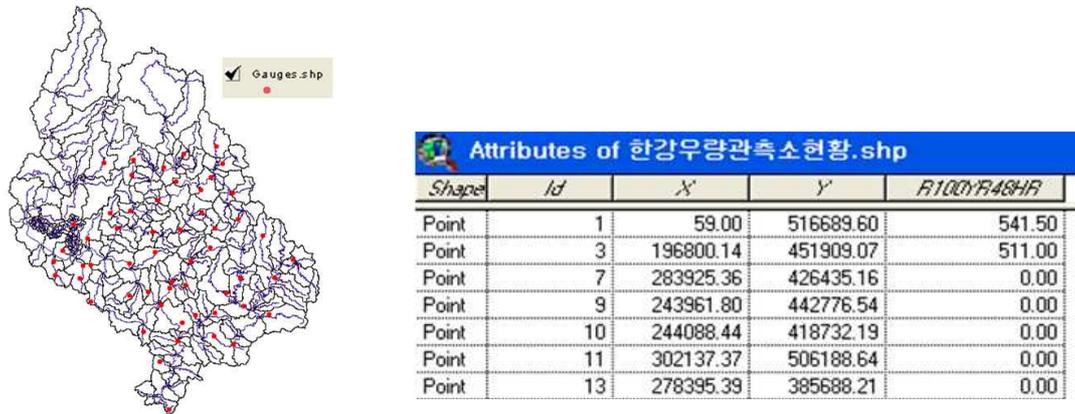
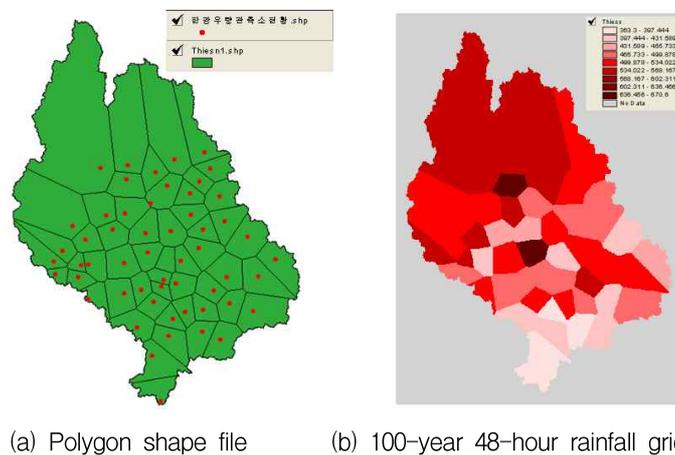


Fig. 3. Rain Gauge Stations (Left) and Input Rainfall Data for Rain Gauge Stations (Right)



(a) Polygon shape file (b) 100-year 48-hour rainfall grid

Fig. 4. Creating Thiessen Polygons

Fig. 3의 좌측 그림은 한강유역 내의 우량관측소 분포를 나타낸 그림이다. 북한지역에 포함된 임진강유역과 북한강유역의 북쪽부분은 우량관측소가 없는 것으로 나타나고 있다. Fig. 3의 우측 그림은 각 관측소별로 100년 빈도 48시간 강우량을 입력하는 화면이다. ID는 우량관측소 번호이고 X, Y는 각각 우리나라 중부원점을 기준으로 한 평면직교좌표계의 동서(easting) 및 남북(northing) 위치 좌표이며, R100YR48HR는 강우량을 입력하는 필드이다. 본 연구에서는 한강유역 종합치수 계획 수립연구(국토해양부, 2008)에서 적용한 강우자료를 이용하였다.

2a) 티센다각형 작성

우량관측소 P_s ($s=1,2,\dots,p$)에 대한 영향권을 결정한다. 본 연구에서는 수문학적으로 타당성이 인정되었을 뿐만 아니라 객관성이 우수하고 적용절차가 명확한 티센다각형법을 채택하였다. Fig. 4는 ArcView의 티센다각형작성 기능을 이용하여 티센다각형 쉐이프파일을 작성하고 각 우량관측소의 강우량자료를 이용하여 100년 빈도 48시간 강우 그리드 파일로 변환한 것이다.

3) 기준 우량관측소 선정 및 강우자료 입력

본 연구에서 제안한 이동강우의 작성방법은 Fig. 5와 같이 임의의 시간에 대한 유역 내 강우의 공간분포가 교호블록형 시간분포를 따르도록 한 것이다. 즉, 시간축상의 교호블록형 강우분포 순서를 유역 내 공간상의 강우 분포배열 순서로 변환하는 것이다.

따라서 유역 내 공간상의 강우분포배열이 정해지기 위해서는 유역을 대표하는 교호블록형 시간분포가 필요하다. 본 연구에서는 유역을 대표하는 기준 우량관측소를 정하여 해결하였다. 기준 우량관측소는 충분한 강우자료가 축적되어 자료의 신뢰성이 높고 특히 단기간 동안의 침두강우(burst)가 비교적 큰 지점을 선택하는 것을 원칙으로 하였다. 본 연구에서는 서울지점을 한강유역의 기준 우량관측소로 선택하였다. 서울 관측소는 위치적으로는 유역의 좌측에 편기되어 있으나 70년 이상의 자료가 축적되어 있으며, 100년 빈도 60분 강우강도가 115.6 mm/hr로 우리나라 집중호우의 특성인 단기 침두강우의 특성을 잘 나타내고 있다.

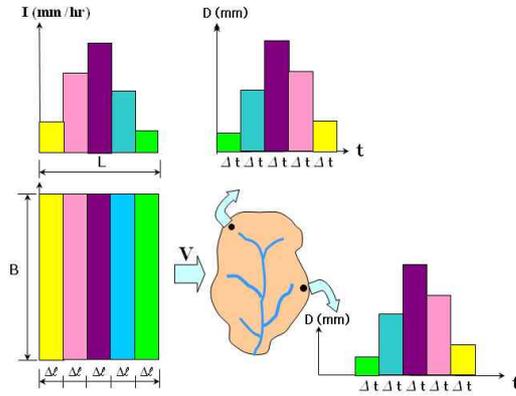


Fig. 5. Conceptual Diagram of Blocking-Type (BK) Moving Storm

등우선은 모의 대상 유역을 전부 포함시킬 수 있어야 한다. 이동방향을 고려한 유역의 통과 길이가 L 이고 강우의 이동속도가 v 라면 최소 등우선 구획수는 Eq. (1)과 같이 구해진다. 전체 모델링 영역을 n 개 이상의 구획으로 분할하여 작성하며 분석목적에 따라 다르게 작성할 수 있다.

$$\text{Min. } n = L / (v \cdot \Delta t) \quad (1)$$

기준 우량관측소에 대한 확률강우량 X 의 교호블록 우량주상도의 강우량이 Δx_i 이며, 우량주상도의 수가 m 이라고 하면 Eq. (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$X = \sum_{i=1}^m \Delta x_i \quad (2)$$

그리고 등우선 구획 번호를 N_j ($j=1,2,\dots,n$)라고 하면, 강우시작 후 $k\Delta t$ 시점의 교호블록 우량주상도와 등우선 구획은 Eq. (3)과 같이 일대일 매칭이 이루어진다.

$$\Delta x_1 \Rightarrow N_k \quad (3a)$$

$$\Delta x_2 \Rightarrow N_{k-1} \quad (3b)$$

...

$$\Delta x_m \Rightarrow N_{k-m} \quad (3c)$$

이동강우를 모의하기 위해서는 이동강우가 유역에 도착한 후 빠져나가는 시점까지 고려해야 한다. t 시간 지속강우를 모의할 경우, 모의 시간 간격이 Δt 이고 등우선 수가 n 개일 때 작성해야 할 최소한의 강우프레임

수는 Eq. (4)와 같다.

$$\text{Min. } f = (t / \Delta t + n) \quad (4)$$

Fig. 6(a)는 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 강우를 작성하기 위한 강우프레임 셰입파일이다. 이동강우에 적용할 호우의 이동방향과 속도를 결정하기 위하여 이동강우에 대한 기존의 국내 연구와 더불어 저기압과 태풍에 대하여 검토하였다. 여름철 우리나라에 집중호우를 발생시키는 저기압은 대부분 황해에서 발달하여 한반도 전역에 영향을 미친다(전종갑, 2004). 황해상에 발달한 저기압은 대략 하루나 이틀 정도면 한반도를 횡단하여 동해로 진출한다. 즉, 저기압기단의 이동방향은 서에서 동이 대부분이다. 한반도 서해안에서 동해안까지 거리가 대략 240 km이므로 평균 5~10 km 정도의 이동속도로 볼 수 있다.

이재형 등(1990)은 유역면적 15,729.2 km²의 금강유역에서 관측된 주요 호우의 이동방향과 속도에 대하여 분석하였다. 금강유역에서 1981년부터 1987년 사이에 관측된 14개 주요 호우의 이동방향과 속도에 대하여 분석하였다. 이들이 분석한 호우의 이동방향은 x축을 기준으로 반시계방향으로 측정된 각도가 1.4~113.7° 범위로 서에서 동(W→E) 내지 남남동에서 북북서(SSE→NNW) 방향이고 평균은 20.8°로 서남서에서 동북동(WSW→ENE) 방향이었다. 호우의 평균이동속도는 7.5 km/hr였다.

한편, 태풍은 평균 30~40 km/hr의 비교적 빠른 속도로 이동하지만 호우로 인한 피해가 크게 발생하는 것은 태풍의 이동속도가 이 보다 훨씬 느릴 경우이다. 태풍 루사(Rusa)는 2002년 8월 30일에서 9월 1일 하루에 강원영동지방 강릉에 898 mm, 지리산 뱀사골 504.5 mm, 제주도 어리목 866.5 mm의 많은 강우량을 나타냈

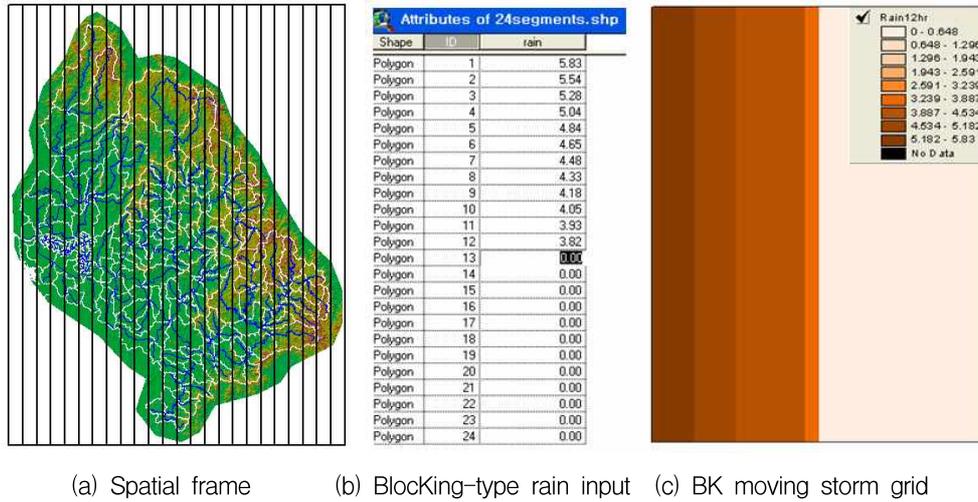


Fig. 6. Spatial Frame for a Storm Moving Eastward

고 특히 강릉지역에는 8월 31일 하루에 870.5 mm의 기록적인 강수량을 기록하였다. 이때 강원영동지역은 북동기류의 비교적 찬 성질의 기류가 지속적으로 유입되었을 뿐만 아니라 태풍이 느린 속도로 북상하여 강우지속기간이 길었던 것이 기상관측사상 최대의 폭우를 기록한 원인으로 분석되었다(육명렬, 2002). 당시 태풍의 이동 기록에 의하면 8월 30일에서 8월 31일 06:00까지 태풍의 이동속도는 11 km/hr 정도로 매우 느리게 북진하였으며, 그 이후 9월 1일 15시경에 열대성 저기압으로 변하여 태풍이 소멸될 때까지는 평균 22 km/hr의 속도로 이동하였다. 우리나라에 상륙하는 태풍의 이동방향은 대부분 남에서 북 또는 남서에서 북동 방향이다.

본 연구에서는 여름철 저기압기단과 태풍의 이동속도 등을 감안하고 실무적인 적용성 등을 고려하여 호우의 이동속도로 $v=10$ km/hr를 채택하여 10 km 간격으로 전체 모델링 영역을 24개의 구획으로 분할하여 작성하였으나 분석목적에 따라 다르게 작성할 수 있다. 각 구획은 교호블록 시간 분포상의 한 시간을 나타내고 있다.

Fig. 6(b)는 강우 개시 12시간 후의 강우자료를 강우프레임 쉐입파일에 입력한 것이다. 각 구획별로 Polygon ID는 좌에서 시작하여 우측으로 1번부터 24번까지 부여하였다. Fig. 6(c)는 강우자료가 입력된 강우프레임 쉐입파일을 그리드 파일로 변환한 것이다. 본 연구에서는 48시간 지속강우를 모의했으며, 구획수가 24개이므로 Eq. (4)에서 $Min. f = (t/\Delta t + n) = (48/1 + 24) = 72$ 개의 강우프레임을 작성하였다. 본 연구에서는 한 시간 간격의 교호블록 시간분포를 채택했으나 분석목적에 따라 임의의 시간 간격을 선택할 수 있고 그에 따라 강우프레임 수가 달라질 수 있다.

3a) 상대티센가중치 산정

지금까지 작성한 이동강우는 기준 우량관측소의 강우량이다. 즉, 위의 Fig. 6에서 작성한 교호블록형 이동강우는 기준 우량관측소인 서울 관측소의 강우량으로서 한강유역 전체에 서울 관측소의 강우량이 내리고 있는 셈이다. 유역 내 강우량의 공간적 불균일성을 반영하기 위하여 상대티센우량가중치는 Eq. (5)와 같이 기준 관측소의 확률강우량 X 와 각 우량관측소의 확률강우량 x_s 의 비로 구한다.

$$w_s = x_s / X \quad (5)$$

상대티센가중치를 구하기 위해서는 Fig. 4(b)의 티센그리드 파일을 기준 우량관측소인 서울의 강우량 511 mm로 나누어 Fig. 7과 같이 서울 관측소를 기준으로 한 각 관측소 티센영역별 상대적인 강우량비를 구한다.

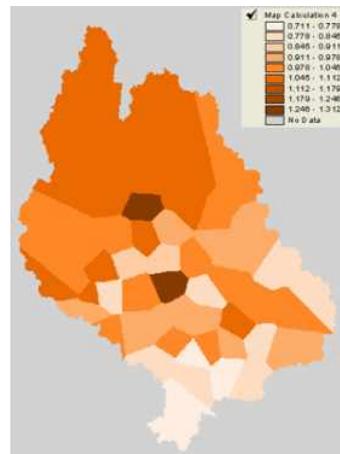


Fig. 7. Relative Thiessen Weight Grid

4) TWBK 이동강우 작성

이동강우 작성의 마지막 단계는 단계 (3)의 기준 우량관측소 강우에 의한 BK (BloKing-type) 이동강우 등우선에 단계 (3a)에서 구한 상대티센우량가중치 w_s 를 곱하여 유역 내 강우의 공간적 분포를 고려한 TWBK (Thiessen-Weighted BloKing-type) 이동강우를 작성하는 것이다. 각 우량관측소 P_s 의 영역별 우량주상도의 강우량 $\Delta \hat{x}_{is}$ 는 Eq. (6)과 같이 구해진다.

$$\Delta \hat{x}_{is} = \Delta x_i \cdot w_s \quad (6)$$

여기서, Δx_i 는 우량관측소 P_s 의 영역과 중첩된 BK 이동강우 등우선의 우량주상도 값이다. Fig. 8은 Fig. 6(c)의 강우 개시 12시간 후의 BK 이동강우 그리드 파일에 Fig. 7의 상대티센가중치 그리드 파일을 곱하여 구한 것이다. 다른 시간대의 강우 프레임도 단계 (3)과 단계 (4)를 반복하면서 작성하였다.

4. 강우-유출 모형의 구축

4.1 Vflo™ 강우-유출 모형

본 연구에서 제안한 TWBK 이동강우의 적용성을 검토하기 위한 모형으로 Vflo™ 모형(Vieux, 2004)을 선정하였다. Vflo™ 모형은 Fig. 9와 같이 유역 전체를 그리드로 등분화하여 유한 요소법에 의하여 해석한다. 유한 요소망의 각 셀들은 표고 데이터에 따라 8가지 방향의 흐름성분을 가질 수 있으며 운동과 방정식(kinematic wave)에 의해 해석되어진다. 셀들은 크게 지표 흐름과 수로 흐름의 속성을 가진 셀들로 구분되고, 흐름 속성 외에 경사, 조도계수, 불투수율, 토양 종류에 따른 침투

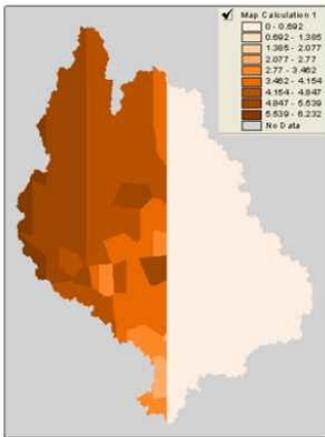


Fig. 8. TWBK Moving Storm Grid 12 Hours After Rainfall Commencement

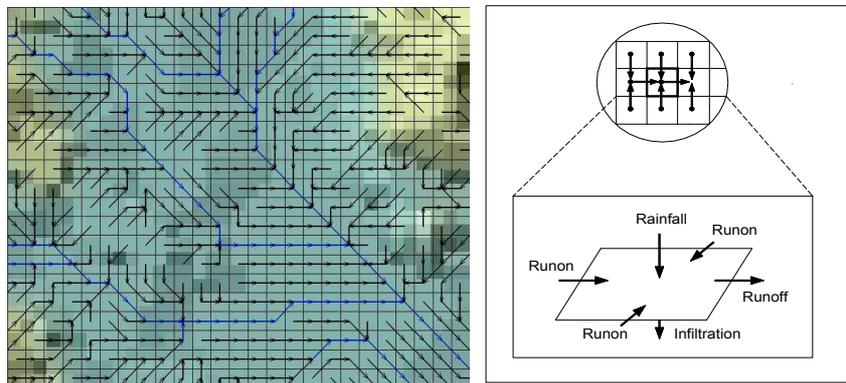


Fig. 9. Vflo™ Finite Elements

계수 등의 속성을 갖는다.

Vflo™ 모형은 운동과 방정식에 의하여 지표면 흐름과 하도 흐름을 추적한다. 초과강우량에 의한 지표면 흐름은 Eq. (7)과 같이 1차원 연속방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = R - I \quad (7)$$

여기서, R 은 강우강도, I 는 침투율, h 는 수심, u 는 지표면흐름의 유속이다. 운동과 방정식이 적용되는 조건 즉, 지표면흐름을 등류로 가정하면 Eq. (8)과 같은 Manning의 등류 경험공식을 적용할 수 있다.

$$u = \frac{S_o^{1/2}}{n} h^{2/3} \quad (8)$$

여기서, S_o 는 지표면 경사이며, n 은 Manning의 조도계수이다. 위의 Manning 공식에 나타난 수심은 지표면 흐름의 특성상 수면폭에 비하여 수심이 매우 작아서 동수반경 대신에 수심으로 대치한 경우이다. Eq. (8)을 Eq. (7)에 대입하면,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{S_o^{1/2}}{n} \frac{\partial h^{5/3}}{\partial x} = R - I \quad (9)$$

Eq. (9)는 Vflo™ 모형에서 지표면흐름을 추적하기 위한 지배방정식이다. 하도에 대한 1차원 연속방정식은 Eq. (7)의 수심 h 대신에 하도 단면적 A 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (10)$$

여기서, Q 는 하도의 유량이며, q 는 하도 단위 길이당 측방 유입량이다. Eq. (10)도 Eq. (7)과 마찬가지로 하도 단면의 제원을 적용한 Manning의 등류 경험공식을 이용하여 Eq. (9)와 같은 형태로 변환할 수 있으며 이 식은 하도흐름을 추적하는 지배방정식이 된다. 이들 지표면흐름과 하도흐름을 추적하는 지배방정식은 운동과 방정식의 적용을 전제로 등류조건을 가정하므로 배수위효과(backwater)가 뚜렷한 구간에는 적용에 제한을 받는다.

VfloTM모형의 침투량 산정은 Green-Ampt 침투능 모형을 적용하고 있다. Green-Ampt 침투능 모형은 Darcy의 법칙을 이용한다. 토양으로 침투한 물은 피스톤 흐름으로 가정하여 상부 포화층과 하부 비포화 토양층 사이에 뚜렷한 경계면을 형성하며 흐르는 것으로 가정한다. Eq. (11)은 침투율을 나타낸다.

$$f(t) = K_e \left(1 + \frac{\Psi(\phi - \theta_i)}{F(t)}\right) \quad (11)$$

여기서, K_e 는 유효포화투수계수, ϕ 는 토양 공극율, θ_i

는 초기 함수율, Ψ 는 습윤선에서의 토양흡인수두, $F(t)$ 는 누적 침투심이고 $f(t) = dF(t)/dt$ 는 침투율이다. Eq. (11)은 Eq. (12)와 같은 적분식 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(t) = K_e t + \Psi(\phi - \theta_i) \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Psi(\phi - \theta_i)}\right) \quad (12)$$

4.2 강우-유출 모형 매개변수 구축

4.2.1 DEM 관련 매개변수

본 연구에서는 격자 크기에 따른 계산의 효율성과 유역경계를 포함한 유역특성의 묘사 정도를 비교 검토하여 Fig. 10과 같이 유역면적 34,300 km²의 한강유역에 대하여 500 m 크기의 격자 480 × 620개를 적용하였다. 2 km² 정도의 작은 소유역에 대해서도 8개 정도의 셀이 할당되어 유역의 특성을 비교적 정확하게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. 세부적인 DEM 처리 및 매개변수 산정은 「분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석」(한국수자원학회, 2009)의 절차와 기준을 적용하였다.

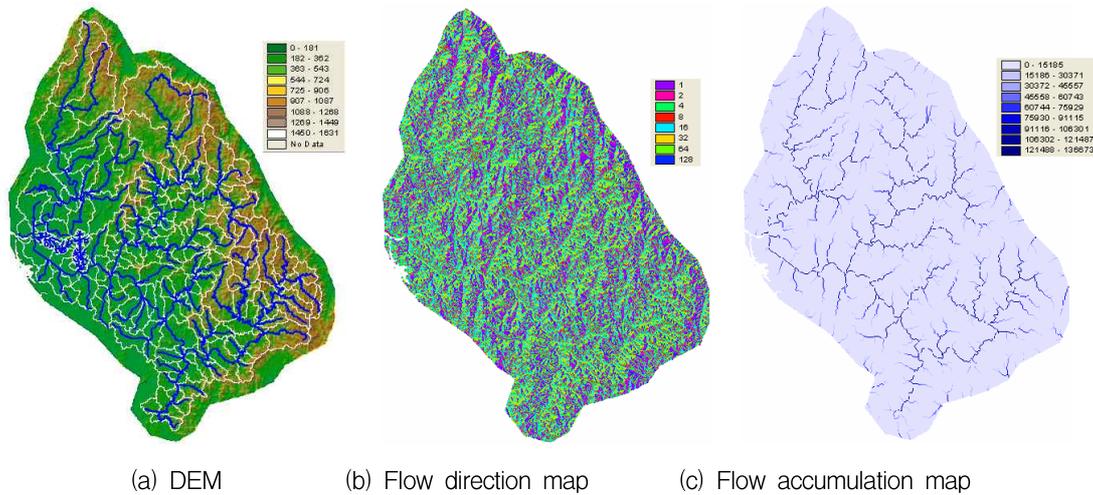


Fig. 10. Terrain Data Processing

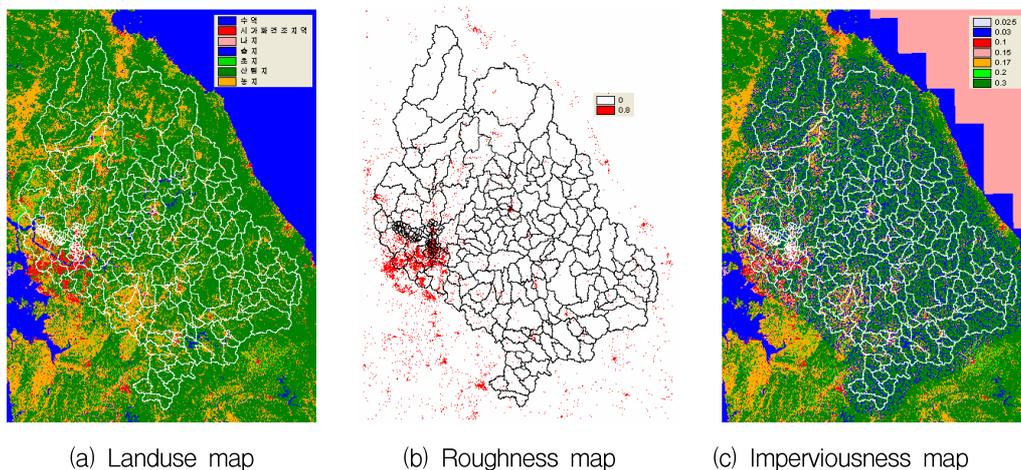


Fig. 11. Landuse Data Processing

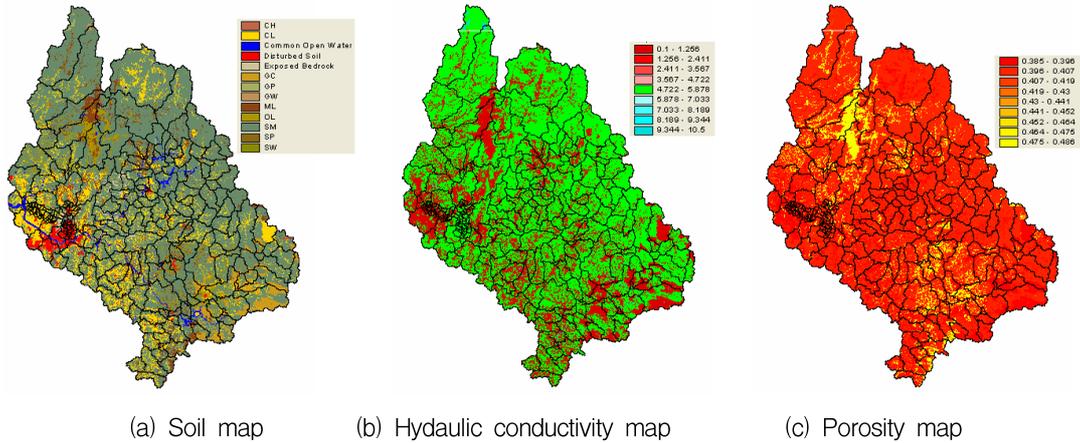


Fig. 12. Soil Data Processing

4.2.2 토지피복도 관련 매개변수

본 연구에서는 토지피복관련 매개변수를 산정하기 위하여 환경부 토지피복도를 이용하였다. Fig. 11(a)는 토지피복도 그리드 파일을 DEM과 동일한 해상도를 갖도록 500 m 격자로 리샘플링(resampling)한 것이며 Figs. 11(b) and 11(c)는 각각 토지피복도로부터 산정된 Manning 조도계수 및 불투수율이다. VfloTM모형에서는 강우를 포함한 모든 입력자료들이 공간적으로 모의 대상 영역과 동일해야 할 뿐만 아니라 동일한 해상도를 가져야 한다. VfloTM모형에서 유한 요소 셀별로 계산하기 위해서는 여러가지 입력자료들이 들어 있는 셀들의 위치가 일치해야 하기 때문이다. 세부적인 토지피복도 처리 및 매개변수 산정은 「분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석」(한국수자원학회, 2009)의 절차와 기준을 적용하였다.

4.2.3 토양도 관련 매개변수

본 연구에서는 토양도관련 매개변수를 산정하기 위하여 통일분류법으로 작성된 토양도를 이용하였다. Fig. 12(a)는 토양도 그리드 파일을 DEM과 동일한 해상도를 갖도록 500 m 격자로 리샘플링(resampling)한 것이며 Figs. 12(b) and 12(c)는 각각 토양도로부터 산정된 투수계수 및 토양유효공극율이다. 세부적인 토양도 처리 및 매개변수 산정은 「분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석」(한국수자원학회, 2009)의 절차와 기준을 적용하였다.

4.3 강우-유출 모형의 보정 및 검증

4.3.1 모형의 보정

본 연구에서 구축한 강우-유출모형을 국제수문개발 계획(IHP) 시범유역인 평창강유역(Fig. 13 참조)을 대상으로 모형 보정을 수행하였다. 평창강은 유역의 최고

봉인 계방산(EL. 1577.4 m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 우리나라의 중동부에 위치한 한강의 제1지류이며 행정구역상으로는 강원도 평창군에 위치하고 있다. 한강수계의 북단부인 동경 128° 02' 07" ~ 128° 31' 30", 북위 37° 06' 34" ~ 37° 43' 55" 사이에 위치하며, 북쪽으로는 홍천강, 동쪽으로는 오대천, 서쪽으로는 섬강과 인접하고 있다. 유역 최하류에 위치하고 있는 방림수위관측소까지의 유역면적은 526.7 km²이며, 유로연장은 51.9 km이고 유역의 평균폭은 10 km이다. 유역의 토지이용은 산림이 86%, 논 10%, 밭 4%로 구성되어 있다. 주거지는 0.14%로 거의 개발이 안된 자연상태의 유역이다. 평창강 유역은 인위적 교란이 적은 곳으로 비교적 장기간 관측된 강우-유출 자료를 보유하고 있으며 수문지형 정보의 일관성이 높다고 하겠다. 유역 내에는 자기우량관측소 11개소와 자기수위관측소 6개소가 설치되어 있다.

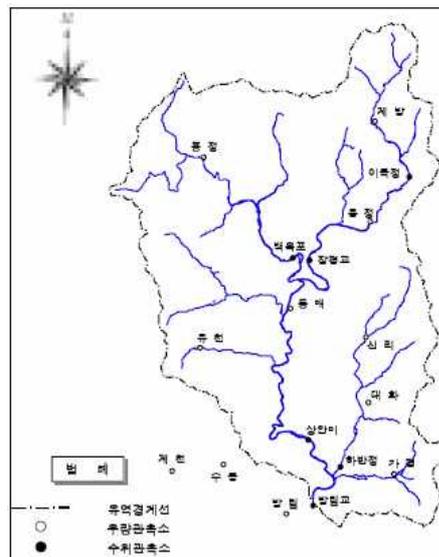


Fig. 13. Pyungchang IHP Experimental Catchment

본 연구에서 모형 보정에 적용한 홍수량은 유역 최하류단 방림지점에서의 관측 수위자료로부터 산정된 값들이다(박상우, 2008). 방림지점에서 결측되거나 모형에서의 계산치와 실측치 간에 차이가 크게 나는 경우에는 상안미지점의 자료도 함께 검토하였다. 매개변수들에 대한 보정은 모의된 모든 호우사상들에 대하여 동일하게 적용하였다. 그러나 유역 초기 조건을 나타내는 하천의 기저유량과 유역의 초기 토양함수율은 매 호우사상마다 시행착오법으로 조정하였다. 본 연구에서 강우-유출 모의를 통한 모형 보정에 적용한 호우사상은 1984년부터 2002년까지 관측된 호우사상 중에

1,000 m³/s 이상의 첨두홍수량을 발생시킨 6개의 주요 호우사상이다. Fig. 14는 누적적센강우량과 VfloTM모형으로 계산한 홍수수문곡선을 나타낸 것이다. 홍수수문곡선에서 가는 적색선은 실측치이고 굵은 흑색선은 모의치이다. 2001년 7월 22일에서 24일 사이에 발생했던 홍수는 방림지점에서 결측되어 상안미지점의 자료를 비교하였다.

Table 2는 방림과 상안미지점의 홍수량 모의치와 실측치를 비교한 것이다. 2001년 방림지점이 결측된 경우만 상안미자료를 이용하였고 나머지는 모두 방림지점 자료이다.

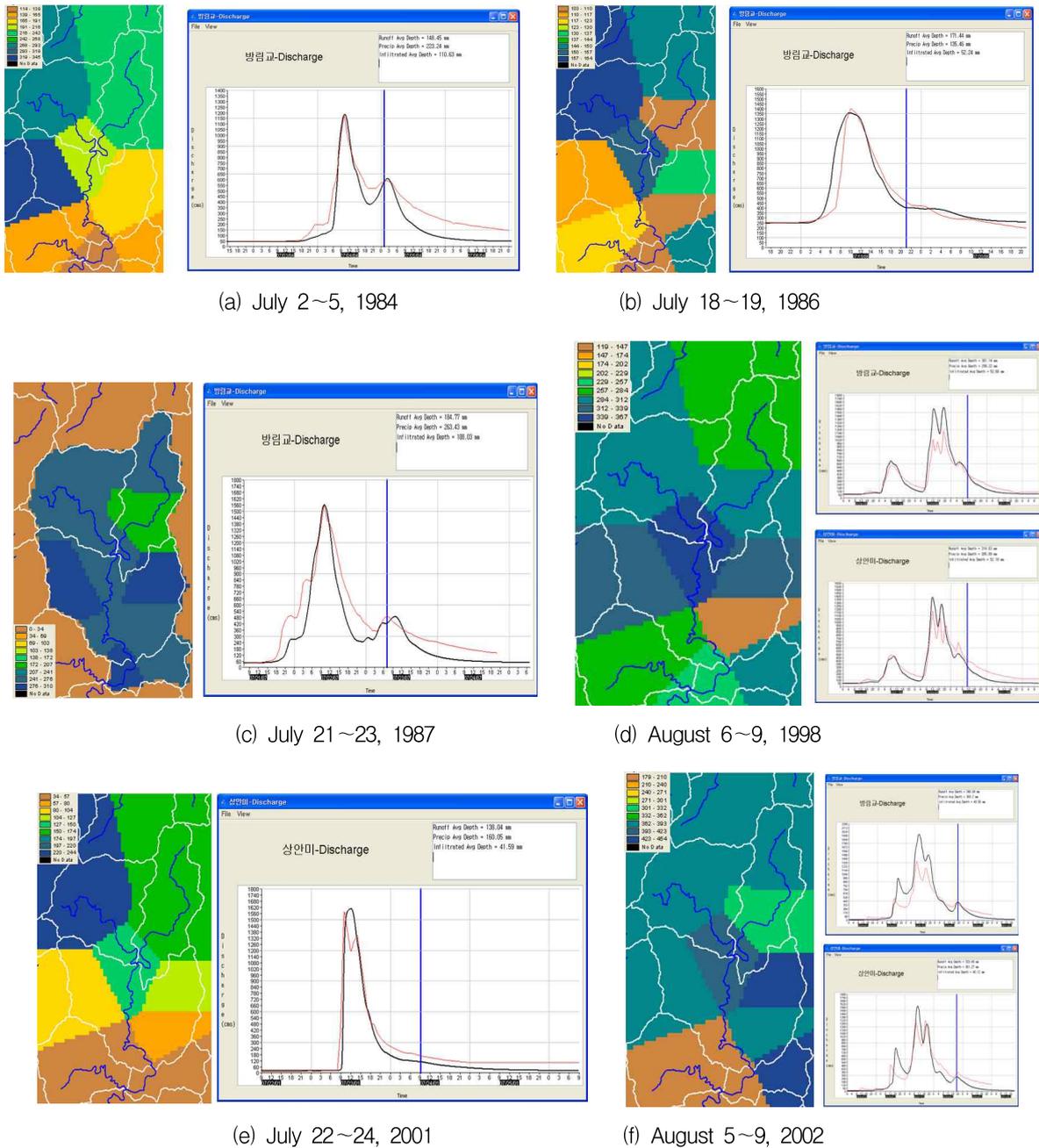


Fig. 14. Cumulative Rainfall Data and Simulated Discharge Hydrographs

Table 2. Vflo™ Model Performance at Bangrim / Sangnmi Station

Date of rainfall events	Initial saturation (%)	Base flow (m ³ /s/m)	Rainfall (mm)	Peak discharge (m ³ /s)		Average runoff (%)	Relative error (%)
				Observed	Simulated		
July 2~5, 1984	70	2.0E-04	223	1,182	1,178	50	0.3
July 18~19, 1986	70	9.0E-04	135	1,401	1,356	61	3.2
July 21~23, 1987	71	2.0E-04	263	1,558	1,558	59	0.0
August 6~9, 1998	87	3.0E-04	290	1,176	1,380	82	17.3
July 22~24, 2001	89	1.0E-04	160	1,582	1,606	74	1.5
August 5~9, 2002	90	1.0E-04	369	1,317	1,567	89	19.0
Average	80	3.0E-04	240	1,369	1,440	69	6.9

기저유량은 Vflo™ 모형에서 하도 단위 길이당 유량으로 산정된 값이다. 모의 결과 유역 토양의 초기 함수율은 평균 80 % 정도였으며, 기저유량은 평균 3.0E-4 m³/s/m였으나 1986년 7월 18일 기저유량은 이전 호우의 영향으로 평균 보다 3배 정도 큰 값을 나타냈다. 모의된 호우사상의 총강우량은 평균 240 mm였으며, 모의된 침투유출량은 1,178~1,606 m³/s 범위로 평균 1,440 m³/s였다. 유역 평균유출률은 69 %였으며, 실측치와 비교한 침투유출량의 평균 상대오차는 6.9 %로 비교적 양호한 것으로 분석되었다.

4.3.2 모형의 검증

본 연구에서는 중랑천유역과 임진강유역을 대상으로 이동강우인 레이더 강우자료를 이용하여 모형의 검증을 수행하였다. 중랑천 유역은 면적이 300 km²이며, 서울시, 의정부시, 양주시를 포함하는 도시화된 유역이다. 유역 내에는 기상청 우량관측소 뿐만 아니라 한강홍수통제소에서 운영하는 중랑교 수위관측소와 우위관측소가 설치되어 있어서 계측 유역에 대한 적용성을 판단하기 위한 유역으로 선정하였다.

임진강 유역은 면적이 8,160 km²로 유역면적의 2/3가 북한지역에 포함되어 있어서 강우관련 수문자료가 거의 없는 미계측 유역에 해당된다. 그러나 적성, 군남, 전곡

에 수위관측소가 있어서 홍수량을 점검할 수 있으므로 미계측유역에 대한 적용성을 판단하기 위한 유역으로 선정하였다.

Fig. 15는 본 연구에서 적용한 2006년 7월 12일~13일 사이에 발생한 호우사상에 대한 레이더 강우 합성영상이다. 2006년 7월 12일~13일 사이에 발생한 호우는 전형적인 국지성 집중호우로서 정발산역이 침수되는 등 경기도 파주 일원에 큰 피해를 입혔다.

Fig. 16(a)는 RAIDOM 기법으로 처리한 레이더 강우에 의한 한강유역의 유출량 산정 과정을 나타낸 것이며, Fig. 16(b)는 곡릉천 일대를 확대한 것이다.

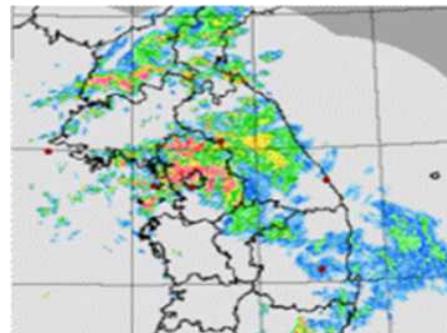
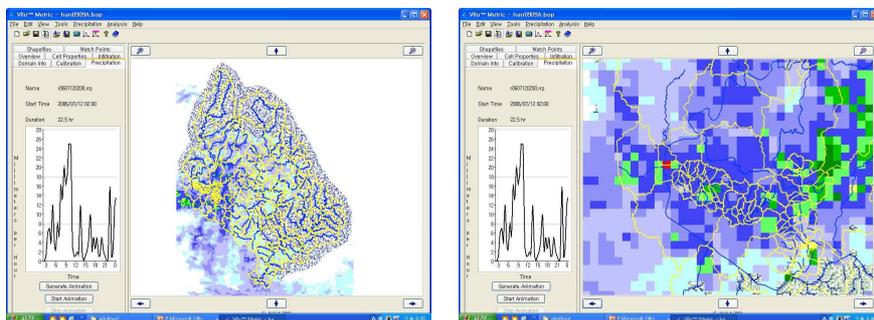
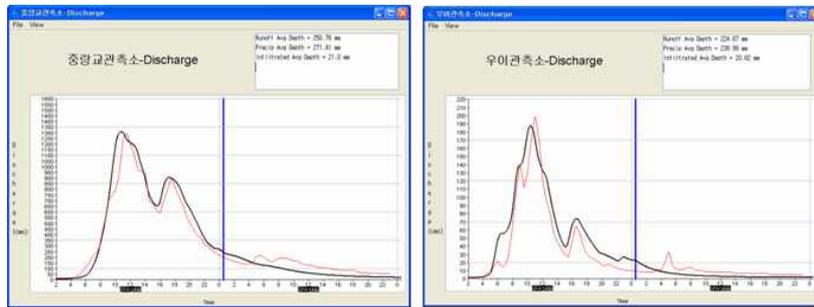


Fig. 15. Radar CAPPI Image for the Storm of July 12~13, 2006



(a) Han river basin (b) Gokrungchun area

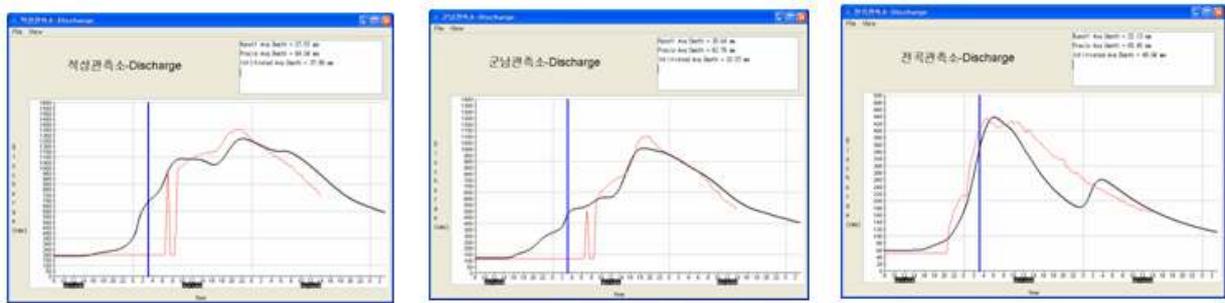
Fig. 16. Vflo™ Simulation Using Radar Rainfall Data (July 12~13, 2006)



(a) Jungrang

(b) Wooi

Fig. 17. Observed and Simulated Hydrographs (Gauged Catchments)



(a) Juksung

(b) Gumnam

(b) Jungok

Fig. 18. Observed and Simulated Hydrographs (Ungauged Catchments)

Fig. 17은 중랑교수위관측소와 우이수위관측소에서 관측된 실측 홍수수문곡선과 레이더 강우를 적용하여 모의한 홍수수문곡선을 비교한 것이다. 레이더 강우량은 30분 간격으로 입력하였다.

Fig. 17에서 가는 적색선이 실측홍수량, 굵은 흑색선이 모의치이다. 그리고 청색으로 표시된 굵은 수직선은 강우가 종료된 시점을 표시한 것이다. 두 관측지점에서 제1첨두홍수량과 제2첨두홍수량이 발생 시점과 크기면에서 잘 재현되고 있으며 상승부와 하강부도 잘 재현되고 있다.

Fig. 18은 임진강유역의 적성, 군남, 전곡수위관측소에 대하여 실측치와 모의치를 비교한 것이다. 미세측유역으로서 지상 측정 강우에 의한 레이더 강우의 보정이 불가능했음에도 불구하고 홍수수문곡선의 첨두와 상승 및 하강 경향이 전반적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 실측수문곡선은 홍수량이 급격하게 변화하는 구간에서 전혀 변화가 없다가 갑자기 비정상적으로 변하는 등 수위 계측기에 다소 문제가 있었던 것으로 판단된다. 본 연구에서는 실측치와 모의치의 정량적인 비교 검토는 수행하지 않았다.

본 연구에서 2006년 7월 12일~13일 사이에 관측된 호우사상을 대상으로 레이더 강우자료를 적용하여 산정한 홍수수문곡선은 실측치와 비교적 잘 일치하는 경향

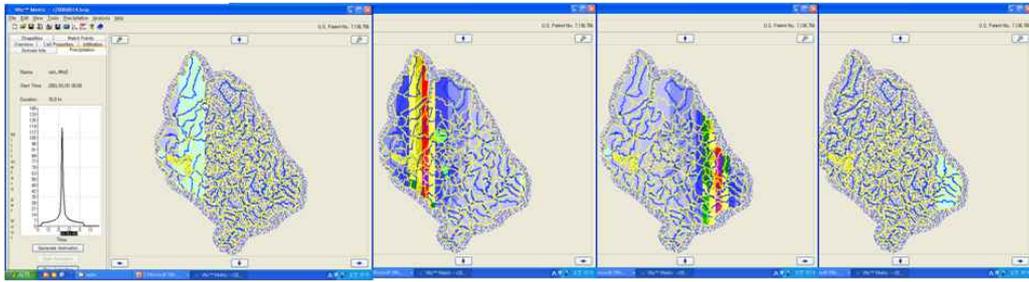
을 나타내어 본 연구에서 구축한 강우-유출 모형의 적용성을 검증할 수 있었다.

5. TWBK 이동강우의 적용 및 고찰

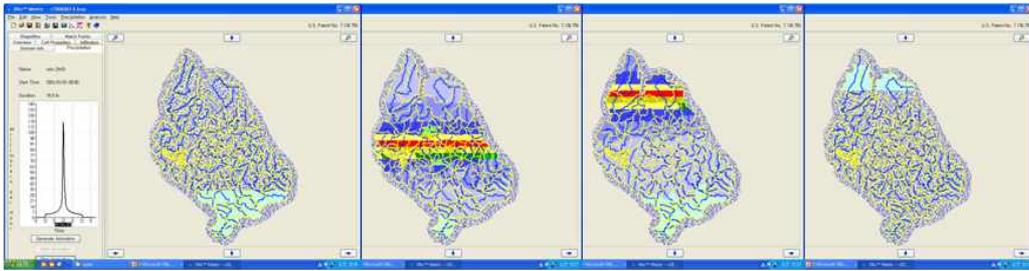
본 연구에서는 한강유역을 대상으로 100년 빈도 48시간 지속기간의 TWBK 이동강우를 모의하였다. 우리나라의 여름철 저기압 기단과 태풍의 이동 등을 감안하여 이동속도를 10 km/hr, 이동방향은 서에서 동, 남에서 북, 남서에서 북동의 세 방향에 대해서 검토하였으나 분석 목적에 따라 다른 속도와 방향을 적용할 수 있다. TWBK 이동강우는 앞의 3장에서 기술한 방법으로 구축하였으며, Fig. 19는 구축된 TWBK 이동강우를 Vflo™모형에 입력하여 애니메이션 기능으로 이동하는 모습을 네 장면씩 스크린 캡처한 것이다.

본 연구에서 검토한 TWBK 이동강우 세 가지를 한강유역에 적용하여 주요 지점에 대한 첨두홍수량을 산정한 결과는 Table 3과 같다. 본 연구에서 검토한 홍수량은 댐의 영향이 포함되지 않은 자연홍수량이다.

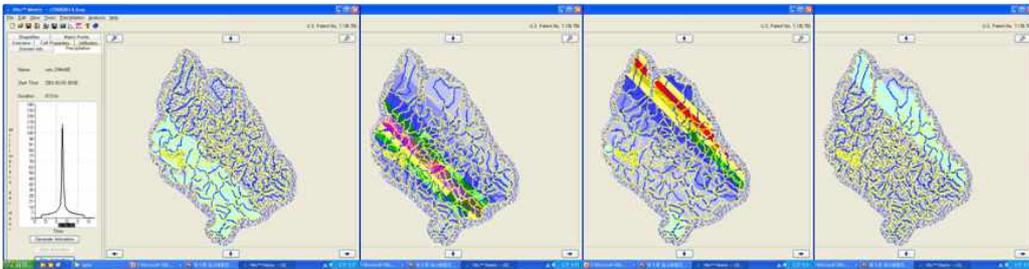
Table 3에서 경험식은 김남원과 원유승(2004)에 의하여 제안된 Eq. (13)에 의해 계산된 값으로 한강유역의 홍수량 실측치를 지역빈도해석하여 구한 식이다. 이 식은 유역면적 100~20,000 km² 범위에 적용할 수 있으며, 100년 빈도 홍수량을 개략적으로 판단해 볼 수 있다.



(a) West to east



(b) South to north



(c) Southwest to northeast

Fig. 19. TWBK Moving Storms

Table 3. TWBK Peak Discharges Compared with Empirical Equation

Location	Area (km ²)	Empirical Eq.(m ³ /s)	Peak discharge from TWBK(m ³ /s)		
			W ⇒ E	S ⇒ N	SW ⇒ NE
Namhangang outlet	12,360	27,250	17,710	19,040	16,670
Bukhangang outlet	10,650	24,530	27,980	24,140	29,880
Imjin river outlet	8,160	20,310	20,490	15,690	17,020
Chungju dam	6,610	17,500	14,450	13,900	13,260
Peace dam	3,040	10,100	15,240	11,830	13,590
Soyanggang dam	2,680	9,240	7,890	8,540	8,680
Pyungchanggang outlet	1,760	6,860	6,690	5,480	5,590
Dalchun outlet	1,580	6,360	4,940	6,610	6,300
Hongchungang outlet	1,570	6,330	4,950	5,860	5,110
Jungrangchun outlet	300	1,960	2,730	2,110	2,160
Anyangchun outlet	286	1,890	2,170	3,140	2,650
Gokrungchun outlet	259	1,760	2,120	2,830	2,400
Average	4,100	11,200	10,600	9,900	10,300

$$Q = 34.732A^{0.7074} \quad (R^2 = 0.9430) \quad (13)$$

여기서, A 는 유역면적(km²)이며, Q 는 유량(m³/s)이다.

TWBK 이동강우에 의하여 산정된 각 지점별 최대침투홍수량의 평균은 11,300 m³/s로 경험식의 평균인 11,200 m³/s와 1 % 이내로 일치하였다. 한편, 이동방향별 침투홍수량의 평균은 경험식 보다 5~12 % 정도 작게 산정되었다. 이것은 지역빈도해석에 사용된 홍수량 실측치들이 연최대치계열로서 여러가지 방향의 호우중에서 최대침투홍수량을 발생시킨 호우의 홍수량 값이 채택되었기 때문으로 추정된다.

달천유역과 홍천강유역은 유역면적이 비슷하여 경험식에 의한 홍수량은 비슷한 값이 계산되고 있다. 그러나 TWBK 이동강우에 의한 홍수량은 서→동의 이동강우에서는 그 결과가 유사하나 남→북, 남서→북동의 경우 달천유역의 유출량이 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 강우-유출에 미치는 유역의 형태학적인 영향이 큰 것으로 판단된다.

중랑천유역, 안양천유역, 곡릉천유역은 호우의 이동 방향에 따른 침투홍수량의 영향을 상대적으로 크게 받는 것으로 나타났다. 중랑천유역은 서에서 동으로, 안양천유역은 남에서 북으로, 곡릉천유역은 남에서 북으로 각각 유역을 횡방향으로 가로지르는 호우, 상류에서 하류방향으로 진행되는 호우, 횡방향으로 가로지르는 호우에 가장 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 강우-유출에 미치는 유역의 방향성과 형태학적인 영향 때문으로 판단된다.

Table 4는 유역면적이 10,000 km² 이상인 유역들에 대하여 호우의 이동방향에 따른 홍수량의 변화를 비교한 것이다. 유역면적이 커질수록 호우의 이동방향에 의한 침투홍수량 차이가 감소해가는 경향을 보였다. 이것은 유역면적이 일정 규모 이상 커져가면 다양한 방향의 지류로부터 유입된 홍수량이 중첩되어 호우의 이동방향에 의한 효과가 상쇄되기 때문으로 추정되며 추후 이에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5는 팔당지점(유역면적 23,590 km²)에서 한강대

Table 4. TWBK Peak Discharges with Areal Change

Location	Area (km ²)	Max. difference of peak discharges(%)	Peak discharge from TWBK(m ³ /s)		
			W ⇒ E	S ⇒ N	SW ⇒ NE
Hangang outlet	34,150	2.6	53,630	54,270	55,010
Hangang Gr. Bridge	24,780	5.2	41,910	41,160	43,290
Paldang dam	23,590	5.9	41,440	40,780	43,190
Namhangang outlet	12,360	14.2	17,710	19,040	16,670
Bukhangang outlet	10,650	23.8	27,980	24,140	29,880
Average	23,720	7.0	38,670	38,810	39,540

Table 5. Comparison of TWBK Floods with Other Studies for 100-year Frequency Floods

Sources	Peak discharge (m ³ /s)	Data periods / Methods	Remarks
Lee <i>et al.</i> (1995)	37,000~45,000	Frequency analysis with 1917~1992 data	<ul style="list-style-type: none"> Goan(from 1968, dam included) Minimum from Gamma-2 Maximum from LN-2
Yoon <i>et al.</i> (1998)	39,000~43,000	Frequency analysis with 1968~1992 data	<ul style="list-style-type: none"> Hangang Gr. Bridge(dam excluded) Minimum from EV1 Maximum from Pearson type-3
Kim <i>et al.</i> (2009)	56,000	SWAT-K with daily flows	<ul style="list-style-type: none"> Paldang(dam excluded) Daily flows(1986~2005) Applied 1.34 for peak/daily ratio Distribution type EV1
This study	41,000~43,000	Vflo TM with TWBK moving storms	<ul style="list-style-type: none"> Paldang(dam excluded) Minimum from S⇒N Maximum from SW⇒NE

교(유역면적 24,780 km²) 사이 한강본류구간의 홍수량 산정 사례를 비교한 것이다.

이승재 등(1995)은 팔당 직하류 고안에서 결측기간을 제외하고 63년간 관측된 수위자료를 이용하였다. 소양강댐이 건설되기 시작한 1968년부터 25년간은 댐의 영향이 포함되어 있다. 윤용남 등(1998)은 1918년부터 1992년까지 결측기간을 제외한 68년간의 실측자료를 소양강댐 건설 이전(1918~1967)과 이후(1968~1992)로 구분하여 분석하였으며 자연홍수량은 댐건설 이후 크게 증가한 것으로 분석하였다. 본 연구에서 TWBK 이동강우와 분포형모형을 적용하여 산정한 100년 빈도 홍수량을 실측자료를 빈도해석하여 구한 이승재 등(1995), 윤용남 등(1998)의 홍수량과 비교 검토한 결과 본 연구에서 제안한 이동강우 모형의 적용성을 입증할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 설계홍수량산정과 관련하여 국내 실무에서 어려움을 겪는 가장 큰 문제 중 하나인 설계강우의 결정에 대하여 고찰하였다. 보다 구체적으로 살펴보면 설계강우의 시간분포와 공간분포 결정 문제로 집약될 수 있는데 현재 국내에서 널리 적용하고 있는 Huff 분포 기반의 면적우량감소계수를 적용한 방법은 분위선택에 따른 차이가 너무 클 뿐만 아니라 명확한 분위선택의 기준이 없으며, 임의 지속기간에 대한 누적 최대강우량이 확률강우량과 달라지는 문제가 있다. 또한 집수면적에 따라 면적우량감소계수를 적용해야 하므로 홍수량산정 지점별로 다른 강우를 적용하게 되어 상하류가 연계된 일관성 있는 홍수량을 구할 수 없다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 TWBK 이동강우모형을 제안하고 한강유역에 대한 적용성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 설계강우량을 결정하는 기준과 절차를 명확하게 제시할 수 있었다. 그러나 기준 관측소를 결정하는 방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 본 연구에서 제안한 TWBK 이동강우를 적용하여 상류와 하류가 연계된 단일 호우사상에 의한 홍수량을 산정할 수 있었다.
- 3) TWBK 이동강우에 의하여 산정된 최대침투홍수량의 평균치는 경험식의 평균치와 거의 일치하였으며 이동방향별 침투홍수량의 평균은 경험식 보다 다소 작게 산정되었다. 이것은 지역빈도해석에 사용된 홍수량 실측치들이 연최대치계열로서 여

러가지 방향의 호우중에서 최대침투홍수량을 발생시킨 호우의 홍수량 값이 채택되었기 때문으로 추정된다.

- 4) 달천유역과 홍천강유역의 홍수량은 서→동의 이동강우에서는 그 결과가 유사하나 남→북, 남서→북동의 경우 달천유역의 유출량이 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 강우-유출에 미치는 유역의 형태학적인 영향이 큰 것으로 판단된다.
- 5) 중랑천유역, 안양천유역, 곡릉천유역 등 중규모유역에서 호우의 이동방향에 따른 침투홍수량의 변화가 크게 나타났으며, 호우의 이동방향은 유역을 횡방향으로 가로지르거나 상류에서 하류로 진행하는 경우에 가장 큰 침투홍수량이 발생하였다.
- 6) 대유역에 대해서는 유역면적이 커질수록 호우의 이동방향에 따른 침투홍수량 차이가 감소해가는 경향을 보였다. 이것은 유역면적이 커져가면서 다양한 방향의 지류로부터 유입된 홍수량이 중첩되어 호우의 이동방향에 의한 홍수량 변화가 상쇄되기 때문으로 추정되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 7) 본 연구에서 TWBK 이동강우로부터 산정한 홍수량을 홍수위 실측자료를 빈도해석하여 구한 기존 연구의 홍수량과 비교 검토한 결과 이동강우의 적용성을 입증할 수 있었다.

본 연구에서는 TWBK 이동강우를 제한적인 경우이기는 하나 한강유역에 적용하여 설계홍수량산정을 위한 이동강우의 적용성을 입증하였다. 그러나 이동강우의 영향을 받지 않는 소유역의 범위와 대유역의 범위 등에 대한 체계적인 연구가 필요하며, 이동강우의 효과에 영향을 미치는 유역특성인자들에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다. 또한 분포형 강우-유출모형의 모형구축과 매개변수 산정에 대한 많은 연구와 발전이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 일부는 2007년도에 건설교통부가 지원하고 한국물포럼에서 수행한 “치수정책수립을 위한 강우-유출모형의 적용성 분석연구”의 연구결과입니다. 아울러 본 논문의 심사자들이 제시한 의견들은 논문의 질을 향상시키는데 크게 도움이 되었음을 밝히며 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2007). 치수정책수립을 위한 강우-유출모

- 형의 적용성 분석연구.
- 국토해양부 (2008). 한강유역 종합치수계획 수립연구.
- 김남원, 원유승 (2004). “우리나라의 빈도홍수량 추정.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제12호, pp. 1019-1032.
- 김남원, 이정은 (2009). “한강유역의 다목적댐 운영에 따른 빈도홍수량의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 제42권, 제2호, pp. 161-169.
- 박상우 (2008). 평창강 IHP 시범유역자료.
- 배덕효, 이정식 (2004). 도시 강우특성조사 및 지상강우 관측 수집체계 구축. 도시홍수재해관리기술연구사업단. 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-06.
- 오경두 (2009). 미래지향적인 소하천치수계획을 위한 소고. 소하천살리기 특집. 물과 미래, Vol. 42, No. 5, pp. 23-37, 한국수자원학회.
- 육명렬 (2002). “태풍 ‘루사(RUSA)’의 이동에 따른 기상 현상.” 제2회 재해관리기술세미나-2002 풍수해 특성과 재해대책-, pp. 1-39, 한국방재협회/행정자치부.
- 윤용남, 원석연 (1998). “한강 인도교 지점의 계획홍수량 산정을 위한 지점빈도해석.” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제4호, pp. 59-65.
- 윤용남, 안재현, 이상렬 (2004). 도시하천 유역종합 치수 계획 수립기술. 도시홍수재해관리기술연구사업단. 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-14.
- 이승재, 서규우, 허준행, 조원철 (1995). “한강 고안지점의 홍수위 환산과 홍수 빈도해석.” **한국수자원학회논문집**, 제28권, 제5호, pp. 191-204.
- 이재형, 전일권, 임용택 (1990). “호우역의 이동특성.” **한국수자원학회 학술대회지**, 수공학논총 32권, pp. 53-60.
- 전종갑 (2004). 한국의 기후 제3장 대기순환의 특성. pp. 57-82, 기상청 기상연구소.
- 조용수, 전민우, 김훈 (2005). “유역형상에 의한 이동강우의 유출분석.” **한국수자원학회 '05 학술발표회 논문집**, pp. 649-653.
- 최계운, 이희승, 안상진 (1993). “분포형 모델을 이용한 유역내 이동강우의 유출해석(II): 모델의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제26권 제1호, pp. 81-91.
- 최계운, 강희경, 박용섭 (2000). “GIS를 활용한 유역내 이동강우에 의한 유출특성 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제33권 제6호, pp. 793-804.
- 한건연, 전민우, 최규현 (2004). “이동강우에 의한 유출 영향분석.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제10호, pp. 823-836.
- 한국수자원학회 (2009). 분포형 모형 *VfloTM*에 의한 수문 해석. 제20회 수공학워크샵 (http://www.kwra.or.kr 자료실/수공학워크샵).
- Foroud, N., Broughton, R.S., and Austin, G.L. (1984). “The effects of a moving rainstorm on direct runoff properties.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 20, No. 1, pp. 87-91.
- Hoblit, B., Zelinka, S.C. and Curtis, D. (2004). “Spatial Analysis of Storms Using GIS.” *ESRI 2004 GIS User Conference Proceedings*, http://gis.esri.com/library/userconf/proc04/abstracts/a1891.html
- Jensen, M. (1984). “Runoff pattern and peak flows from moving block rains based on a linear time-area curve.” *Nordic Hydrology*, Vol. 15, pp. 155-168.
- Marcus, N. (1964). *A laboratory and analytical study of surface runoff under moving rainstorms*. Unpublished Ph.D. thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Maksimov, V.A. (1964). “Computing runoff produced by a heavy rainstorm with a moving center.” *Soviet Hydrology*, No. 5, pp. 510-513.
- McCuen, R.H. (1989). **Hydrologic analysis and design**. Prentice Hall Inc.
- Niemczynowicz, J. (1984a). “Investigation of the influence of rainfall movement on runoff hydrograph: Part I. Simulation of conceptual catchment.” *Nordic Hydrology*, Vol. 15, pp. 57-70.
- Niemczynowicz, J. (1984b). “Investigation of the influence of rainfall movement on runoff hydrograph: Part II. Simulation of real catchments in the city of Lund.” *Nordic Hydrology*, Vol. 15, pp. 71-84.
- Roberts, M.C. and Klingeman, P.C. (1970). “The influence of landform and precipitation parameters on flood hydrographs.” *Journal of Hydrology*, Vol. 11, pp. 393-411.
- Sargent, D.M. (1981). “An investigation into the effects of storm movement on the design of urban drainage systems: Part 1.” *The Public Health Engineer*, Vol. 9, pp. 201-207.
- Sargent, D.M. (1982). “An investigation into the effects of storm movement on the design of urban drainage systems: Part 2. Probability

analysis.” *The Public Health Engineer*, Vol. 10, No. 2, pp. 111-117.

Singh, V.P. (1998). “Effects of the direction of storm movements on planar flow.” *Hydrological Processes*, Vol. 12, pp. 147-170.

Surkan, A.J. (1974). “Simulation of storm velocity effects of flow from distributed channel network.” *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 6, pp. 1149-1160.

Vieux, B.E. (2004). **Distributed Hydrologic Modeling**

Using GIS (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.

Yen, B.C. and Chow, V.T. (1968). *A study of surface runoff due to moving rainstorms. Hydraulic Engineering Series*, No. 17, p. 112, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois.

논문번호: 09-124	접수: 2009.11.09
수정일자: 09.12.17/10.01.04	심사완료: 2010.01.24