

산지유역의 돌발홍수 발생 위험지역에 대한 평가기법



이 정 호 |

국립한밭대학교 토목공학전공 전임강사
leejh@hanbat.ac.kr



박 무 중 |

한서대학교 토목공학과 부교수
mjpark@hanseo.ac.kr



전 환 돈 |

국립서울산업대학교 건설공학부 조교수
hwjun@snut.ac.kr

1. 들어가며

최근들어 기상 이변에 따라 단시간에 집중되는 국지호우로 인하여 돌발홍수(Flash Flood)에 의한 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 대하천의 경우에는 각 홍수 통제소에 의한 홍수 예경보 시스템(Flood Warning System)을 통하여 분류 구간에서의 인명 및 재산 피해가 과거에 비하여 상당히 감소하였으나 소하천에서는 반대로 피해가 증가하고 있는 실정이며, 따라서 기존의 홍수 예경보 시스템이 아닌 돌발

홍수에 대한 홍수 예경보(Flash Flood Warning System)의 필요성이 증대되고 있는 실정이다(이종태, 1998, 1999; 국립방재연구소, 1998).

과거 우리나라 홍수예측에 관한 연구의 목적은 느린 홍수위 상승으로 인한 대하천 침수시간 및 지역의 예측과 보호에 집중되어왔다. 그러나 최근 경제력의 향상 및 인간 활동영역의 확대로 인하여 생활 및 레크리에이션을 위한 소하천 및 산악지역의 이용도가 높아지고 있어 비록 경제적으로는 대하천 홍수의 피해가 복잡적이고 클 수 있으나, 산지유역에서의 돌발홍수의 특성이 짧은 시간에 많은 인명 피해를 발생시킨다는 점에서 대하천 홍수 예경보와 연계 혹은 별도의 적절한 산지하천 돌발홍수 예측 및 예경보 시스템이 필요하다. 행정부에서는 이러한 산지하천에서 발생할 돌발홍수에 대비하여 자동 우량국과 경보국을 설치하여 운영하고 있으나, 경보 발령 지점의 선정 및 그 기준에 대한 구체적 근거가 부족한 실정이다(국립공원관리공단, 2003).

수문학적으로 홍수는 시공간적으로 호우의 지속 시간 및 지역적 특성에 따라서 하천홍수(River Flood), 돌발홍수(Flash Flood), 도시홍수(Urban Flood) 및 해안홍수(Coastal Flood)로 구분할 수 있다. 돌발홍수란 지역적으로 좁고(약 100km² 이내) 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하거나 동일한 국지 지역 내에서 빠르게 움직이는 집중 호우(2시간 동안 100mm 이상)나 태풍으로 인하여

수분에서 수 시간의 짧은 시간 내 상류하천의 급격한 수위 상승 및 상류 댐의 파괴를 유발하는 홍수로 정의할 수 있다. 일반적으로 급격한 유속의 증가로 인해 하천 지형이 파괴되고 소 하천상의 교량 및 도로 붕괴 및 유실이 발생할 수 있으며 또한 심각한 토사류를 유발하여 인명 및 재산의 피해 강도가 높아지게 된다. 따라서 급작스런 홍수파로 인하여 대비할 시간적 여유가 상당히 짧아 적게는 몇 십 분에서 3시간 이내인 경우가 대부분으로 그에 따른 인명 및 경제적 손실이 증가하게 된다. 실 예로 국내의 경우 98년도에 지리산 뱀사골과 경북 봉화군 등에 큰 돌발홍수가 일어나 인명과 재산에 막대한 피해를 입힌 바가 있으며, 외국의 경우에도 2003년 미 캘리포니아 샌버나디노와 일본 나가사키 현에 큰 돌발홍수가 일어난 적이 있는 등 돌발홍수는 국내외를 막론하고 발생 빈도가 높으며 그 피해가 크기 때문에 선진국에서도 이에 대한 대비에 큰 관심을 보이고 있다.

돌발홍수의 발생과 관련하여 중요한 요소는 지속 시간과 강우강도이며 특히 지형적 특징과 선행강우와 관련된 토양 및 지표면의 조건도 큰 영향을 미치게 된다. 넓은 의미의 돌발홍수는 댐 또는 제방의 붕괴, 또는 얼음(Ice Jam)에 의해 물의 갑작스런 방출로 인한 것까지 포함하나, 국내에서는 몇 십 분에서 몇 시간동안의 집중호우에 의한 것을 의미한다.

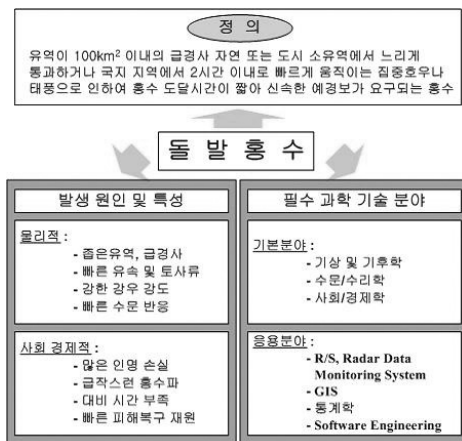


그림 1. 돌발홍수의 정의 및 특성

다. 이러한 집중호우에 의한 돌발홍수는 국지적으로 발생하기 때문에 피해지역은 그리 넓지 않다. 그러나 엘니뇨 혹은 라니냐 등에 의한 이상 기상현상에 의하여 특정지역에 발생하는 국지적 집중호우에 의해 돌발홍수가 과거보다는 자주 조사되고 있다. 최근에 발생한 피해를 분석해 보면 인명의 피해가 대규모로 발생한 특징을 발견할 수 있으며 이는 적절한 돌발홍수 예경보에 의하여 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

국내의 경우 돌발홍수에 대비한 정보는 주로 인명피해를 최소화하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 앞서 언급하였듯이 돌발홍수 예경보를 위하여 현행 관리되고 있는 자동우량국 및 경보국은 설치 지점에 대한 명확한 판단 근거가 부족하여 그 효용성에 대한 평가 자체가 모호한 현실이며, 이러한 문제점으로 인하여 향후 돌발홍수 예경보 지점의 추가 선정 및 적합성의 판단에 있어서 명확한 기준 마련이 절실한 실정이다. 본고에서는 이러한 문제점을 해결하고 돌발홍수 예경보 필요 지점에 대한 기준 마련을 위하여 돌발홍수 발생 위험지역에 대한 평가 지표의 선정과 위험지역 선정 기법에 대하여 소개하고자 한다.

2. 돌발홍수 위험지역 평가 요소

효과적인 산지 돌발홍수 예경보 지점의 선정을 위해서는 유역에 대한 명확한 위험도 평가가 이루어져야 하며, 이를 위해서는 돌발홍수 발생과 관련된 평가 지표의 선정 및 분석 체계의 수립이 필요하다. 돌발홍수의 발생 위험과 관련하여 고려될 수 있는 평가 요소로는 지역특성인자, 강우특성인자 및 지형특성인자로 대별할 수 있다.

(1) 지역 특성 인자

돌발홍수 위험지역을 평가하기 위한 인자로서 돌발홍수로 인한 인명 및 재산의 피해가 발생 가능한

학술/기술기사

지역특성 요소가 우선적으로 검토되어야 하며, 수집 가능한 지역특성 자료를 통하여 유역에 대한 돌발홍수 위험도를 평가하여야 한다. 돌발홍수로 인한 인명피해는 과거에 비하여 여가생활이나 여행의 빈도가 커지고 계곡을 찾는 사람의 수가 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 돌발홍수 위험지역에 대한 평가에 고려되어야 할 지역특성 인자로는 주거단지, 위락지구, 관광지구, 야영장 등 사람들이 쉽게 모이는 곳일수록 돌발홍수 발생 시 인명피해의 발생 위험이 상대적으로 높아질 수밖에 없다. 따라서 돌발홍수 발생 위험이 높으며 예경보가 요구되는 지점의 선정을 위해서는 이러한 지역적 특성 인자가 반듯이 고려되어야 한다.

(2) 강우 특성 인자

돌발홍수 위험지역을 평가하기 위한 또다른 요소로서 강우특성 인자에 대한 고려가 이루어져야 한다. 특정 지점에서 돌발홍수를 야기하는 강우량이 정량적으로 산정된다면 그 강우 발생의 적정성을 판별함으로써 해당 지점의 위험도를 상대적으로 평가할 수 있다. 즉, 돌발홍수 발생 가능 우량의 재현기간이 짧을수록 상대적으로 위험도는 커질 수밖에 없으므로 이에 대한 평가가 정량적으로 이루어진다면 보다 명확한 위험지역 평가 및 효과적인 예경보 지점의 선정이 가능할 것이다. 강우특성 인자를 고려한 위험지역의 평가는 다음과 같은 분석 절차를 통하여 이루어진다.

첫째, 하천 지점에서의 돌발홍수 발생 가능한 한계우량을 분석한다. 일반적으로 하천의 수심이 0.5m 이상일 때 인명의 피해 발생이 가능한 돌발홍수가 발생하였다고 생각할 수 있다. 따라서 해당 지점에서의 돌발홍수가 발생되기 시작하는 수심에서의 하천유량 값이 한계우량에 해당한다. 그리고 한계우량은 한계유량을 발생시키기 위한 최소의 강우량 값으로 정의된다. 하천 지점에서의 한계우량에 대한 한계우량이 산정되어지면, 해당 유역에 대한 확률강우량으로부터 해당 한계우량의 재현기간

을 산정할 수 있다.

둘째, 강우빈도를 고려한 돌발홍수 위험지구를 평가한다. 지점에서의 한계우량에 대한 재현기간이 분석되어지면 산출된 재현기간에 대한 적정성을 판단할 수 있다. 즉, 한계우량의 재현기간이 장기간의 재현기간을 갖는다면 해당 지점에서의 돌발홍수 발생 위험은 그만큼 희박해진다. 반면, 한계우량의 재현기간이 1년 혹은 2년 등 단기간이라면 그 위험도는 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다.

(3) 지형 특성 인자

돌발홍수 위험지역 평가를 위하여 고려되어야 할 지형적 특성은 산지유역에서 급격한 유출의 발생을 유발하는 요소들과 동일하다. 즉, 산지유역에서의 돌발홍수는 유역경사, 하도경사, 하도폭 등의 영향을 지배적으로 받으며 대부분 상류지역의 급격한 경사지역에서 큰 피해를 발생시킨다. 자연유역에서 유출에 영향을 미치는 지형적 요소로는 토지 피복 상태, 유역의 조도계수, 하천의 조도계수, 잠재보유수량 등 다양한 요소들이 있으며, 이러한 요소들을 고려한 수문학적 유출의 분석은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 그러나 돌발홍수가 주로 발생하는 산지의 급경사 지역은 대부분 미계측 유역으로 다양한 수문학적 지형 특성들을 모두 고려하는 것은 불가능하다. 또한 이러한 미계측 유역에서는 유출에 대한 관측자료의 부재 등으로 분석 결과의 타당성을 검증하는 것이 매우 어렵다.

산지돌발홍수에 대한 위험지역의 분석에 있어서 돌발홍수의 예측을 위해서는 수문학적 유출 해석에 기반하여야 한다. 그러나 실제 미계측 유역에서의 이러한 유출 해석은 거의 불가능하므로 수집 가능한 자료의 범위 내에서 최대한 그 오차를 줄일 수 있도록 분석이 이루어져야 한다. 따라서 돌발홍수에 대한 유역의 위험도 분석에 있어서는 지형적 특성 데이터가 수집 및 재처리에 용이해야 한다. 특히, 전국적인 위험도의 분석 및 위험지역의 분류를 위해서는 대단위의 정보 처리가 가능한 지형적 요소들로 압축

선정되어야 한다. 본고에서는 돌발홍수 위험지역 평가를 위하여 일반적으로 하천 내 사람들의 유입이 용이한 하천폭을 지형특성 인자로서 선정하였다.

3. 산지유역 돌발홍수 위험지역 평가

산지돌발홍수의 예측은 선행시간을 확보하여 유역 내 강우량에 따른 유출 발생량을 모의하고 모의된 결과를 바탕으로 예경보를 발령함으로써 산지유역에서의 인명 및 재산의 피해를 최소화하는데 그 목적이 있다. 이러한 산지돌발홍수의 예경보에 있어서 홍수모형의 적용상의 문제점은 신뢰할만한 유출 해석의 문제를 우선으로 하지만 이와 함께 유출 해석을 통한 경보 발령이 어느 지점을 기준으로 하여야 하는가의 문제를 가지고 있다. 즉, 미계측 유역내의 돌발홍수에 대한 위험도의 평가를 통하여 예경보가 발령되어야 할 주요 지점에 대한 선정의 문제가 우선 해결되어야 한다. 본고에서는 과거 돌발홍수 피해 발생 사례가 보고된 봉화군 일부 유역에 대한 위험지역 평가 결과를 수록하였다.

(1) 지역특성인자 분석

산지유역에서 발생하는 돌발홍수는 인명 및 재산의 피해를 야기하며, 관광객들이 밀집되는 도립공

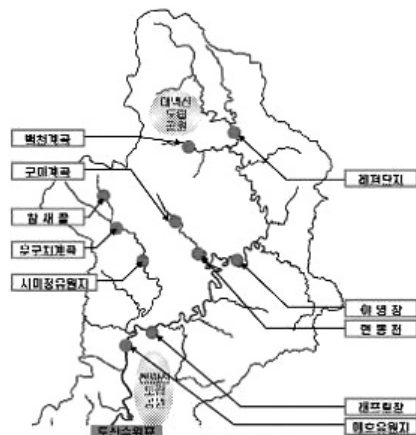


그림 2. 주요 관광지 현황(봉화군)

원 및 관광객들은 피해 가능성이 높은 위험지구로 분류되어야 한다. 따라서 돌발홍수의 경보가 발령되어야 할 지점 또한 돌발홍수 발생 시 피해가 발생할 여지가 있는 곳을 위주로 선정되어야 한다.

돌발홍수로 인한 인명 및 재산의 피해가 발생 가능한 지역에 대하여 경보 발령 지점으로의 선정 및 위험도의 평가를 위해서는 전체 유역을 적정한 단위로 분할하여야 한다. 분할된 유역 단위에서 돌발홍수의 위험도에 대한 평가를 위해서는 각 분할 유역별 인구밀도, 토지이용도, 잠재피해능 등의 데이터를 통한 종합적인 평가가 이루어져야 한다. 그러나 실제 어떤 유역에 대한 인구밀도 등의 자료의 수집은 쉬운 일이 아니므로 전국 단위의 유역에 대한 위험지구의 산정을 위한 특성지표로 선정되기 위해서는 포괄적인 평가 작업이 가능하도록 데이터의 처리가 가능한 지표여야만 한다. 본 장에서는 우선적으로 봉화군 유역 내 주요 관광지 현황을 조사하여 이 지점을 우선적으로 경보 발령 지점으로 선정하였다.

(2) 강우특성인자 분석

봉화군 유역에 대한 돌발홍수 발생 가능 유량인 한계유량 및 한계우량의 산정을 위해서 주변관광지, 하천 합류점 등을 고려하여 위험지역 평가 대상 17개 지점을 선정하여 그림 3에 나타내었으며, 각 지점별 한계우량의 재현기간 분석 결과는 표 2와 같다.

표 1. 주요 관광지 현황(봉화군)

주요 관광지	주소지
청량산 도립공원	경북 봉화군 명호면 관창리
태백산 도립공원	강원도 태백시 소도동
백천계곡	경북 봉화군 석포면 대현리
구마계곡	봉화군 소천면 고선2리
참새골	경북 봉화군 춘양면 애당2리
우구치 계곡	봉화군 춘양면 우구치리
사미정 유원지	경상북도 법천면 소천2리
매호 유원지	봉화군 명호면 도천1,4리
래프팅장	경북 봉화군 명호면
사시청류 현동천	봉화군 소천면 현동리
학생야영장	경북 봉화군 소천면
레저단지	강원도 태백시 동점동

표 2. 지점별 한계우량의 재현기간 및 하천폭

지점	한계우량 (m ³ /sec)	도달시간 (hr)	한계우량 (mm)	재현기간	하천폭(Bc) (m)
1	34.42	2.22	17.30	3년	61.6
2	41.50	3.38	19.71	2년	79.3
3	47.07	4.21	20.84	5년	93.2
4	61.45	4.65	21.32	10년	114.4
5	62.58	4.64	23.89	10년	102.2
6	89.12	5.30	22.55	20년	147.6
7	17.79	3.06	16.62	30년	53.0
8	87.81	9.25	27.92	20년	166.4
9	104.49	7.02	25.28	30년	172.7
10	106.75	7.67	25.87	50년	180.6
11	25.58	1.12	12.09	100년	47.0
12	113.51	8.35	26.26	50년	194.9
13	32.47	2.97	23.44	50년	51.8
14	36.68	3.58	24.99	70년	58.5
15	50.11	3.62	26.99	80년	66.6
16	43.70	4.85	27.12	80년	73.6
17	135.44	8.82	25.43	50년	233.0

돌발홍수에 대한 한계우량의 산정을 통하여 재현기간을 분석한 결과 2년빈도부터 100년 빈도까지 다양한 값이 산정되었다. 이때 한계우량의 재현기간이 짧을수록 돌발홍수의 발생 가능성은 높아지며, 따라서 예경보 지점으로서의 적정성이 상대적으로 판단되어질 수 있다. 이때 위험지역에 대한 판단 및 적정성 평가 요소로서의 재현기간에 대한 기

준 빈도는 다양한 측면을 고려하여 선정되어야 하며, 본고에서는 미계측 유역에 대한 유출 해석 과정에서의 불확실성을 고려하여 그 기준 빈도를 50년으로 설정하였다. 따라서 한계우량의 발생 가능성이 50년 미만인 지점은 상대적으로 위험지역으로 분류되어 돌발홍수 예경보가 필요한 지점으로 평가하였으며, 그 결과 봉화군 유역 내 13개 지점에 해당하는 유역이 위험지역으로 평가되었다. 그림 4에서 음영으로 처리된 부분이 이에 해당하는 유역을 나타내고 있다.

(3) 지형특성인자 분석

하천 지점에서의 하천폭은 김홍태(2005)의 연구 결과 도출된 하천폭(Bc) 산정식을 이용하였다.

$$Bc=2.9772 \times A^{0.620} \quad (: \text{유역면적(km}^2\text{)})$$

돌발홍수로 인한 피해 위험이 높은 지역의 분류 및 예경보 필요 지점의 선정을 위한 하천폭의 기준은 해당 하천폭 산정식과 실제 현장과의 오차를 고려하여 100m로 기준하였다. 하천폭이 100m 이상인 지점에서는 일반적으로 관광객들의 입수가 현실상 이루어지지 않으므로 돌발홍수 예경보가 불필요

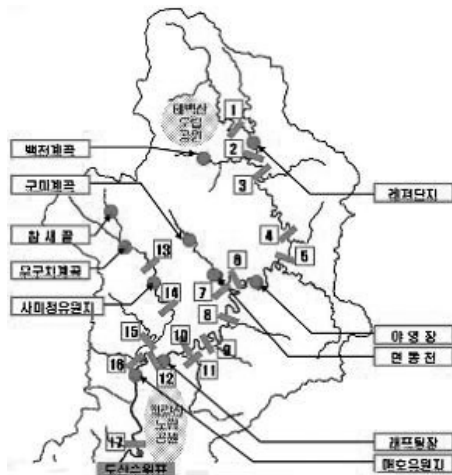


그림 3. 주요 관광지 현황(봉화군)

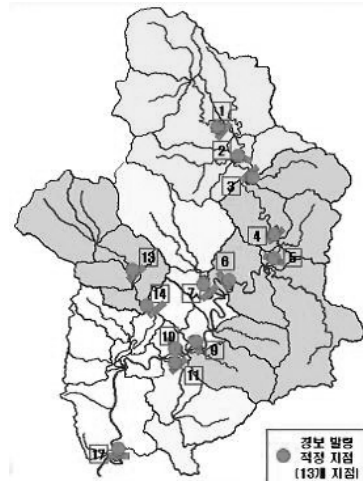


그림 4. 강우특성인자를 고려한 위험지역

표 3. 돌발홍수 예경보 필요 지점의 선정

지점	평가인자 주요 관광지 유무	재현기간 검토		하천폭 검토		예경보 적정지점
		빈도 (년)	적정성 여부	Bc (m)	적정성 여부	
1	●	5	●	61.6	●	●
2	●	10	●	79.3	●	●
3	●	10	●	93.2	●	●
4		20	●	114.4		
5		30	●	102.2		
6	●	20	●	147.6		
7	●	3	●	53.0		●
8		100		166.4		
9		50	●	172.7		
10		50	●	180.6		
11	●	2	●	47.0	●	●
12	●	70		194.9		
13	●	30	●	51.8	●	●
14	●	50	●	58.5	●	●
15		80		66.6	●	
16	●	80		73.6	●	
17		50	●	233.0		

한 지점이다. 봉화군 유역 내 최고차 하천 평균 하폭을 고려한 경보발령 적정 지점을 검토한 결과 총 8개 지점이 적정한 지점으로 선정되었다.

이상의 지역특성인자, 강우특성인자 및 지형특성인자에 대한 분석 결과를 토대로 위험지역을 종합 평가하여 돌발홍수 예경보 필요 지점을 선정할 결과 봉화군 유역 내 총 7개 유역이 위험지역으로 분류되었으며 따라서 해당 지점들은 돌발홍수 예경보가 필요한 지점으로 분석되었다. 표 3에 이러한 결과를 수록하였다.

4. 맺으며

돌발홍수는 사망피해를 발생시킬 수 있는 위험성을 내포하고 있으므로, 돌발홍수가 발생할 가능성이 있는 지역에서는 돌발홍수에 의한 피해를 최소화할 수 있는 대책이 필요하다. 돌발홍수에 대한 피

해경감 대책은 구조적인 방법과 비구조적인 방법으로 구분할 수 있다. 구조적인 방법은 일반적인 하천 정비 계획과 유사하게 예상되는 호우 규모를 설정하고 이에 대한 강우-유출 관계를 적용하여 피해위험이 큰 지역에 제방축조와 같은 구조물을 설치하고, 하천구조물의 내구연한도 증가시키는 사전 예방적인 대책이다. 또한 비구조적인 방법은 집중호우 발생이 예견될 때 선행하여 발령할 수 있는 돌발홍수 예경보 시스템, 위험지역에 대한 재해지도, 위험 표지판 등이 포함된다.

일반적으로 종합적인 돌발홍수 예경보 시스템은 강우감지장치 및 예측모형, 유무선 통신수단, 예경보 기준 및 주민의 대응기준으로 구성된다. 즉, 돌발홍수 예경보 시스템은 호우를 측정하기 위한 강우 감지장치들로부터 시작되며, 이러한 강우감지장치들로부터 얻어진 자료와 예측모형을 이용하여 예보관은 경보가 필요한지 여부를 판단하거나 자동적으로 예경보를 발령하게 된다. 다음으로는 여러 경로의 통신수단을 이용하여 경보를 발령하게 되는데, 통신수단 역시 예경보 시스템의 중요한 부분이다. 마지막으로 예경보를 듣는 주민들과, 그에 따른 주민의 반응이 예경보 시스템의 말단 요소를 이루게 된다. 이러한 돌발홍수 경보 자체가 생명과 재산을 구할 수는 없으나 개개인이 그 정보에 기초하여 대응함으로써 피해예방이 가능하게 된다. 작은 규모의 돌발홍수 발생 시에는 운전중인 사람들이 돌발홍수 경보 발령중임을 알고 있다는 사실만으로도 잘못된 판단을 하는 것을 예방하여 안전도를 향상시킨다. 대규모의 돌발홍수 시에는 마을에서 피난하거나 또는 깊은 강가나 협곡에 있을 때 높은 지대로 대피하는 것과 같은 보다 적극적인 대응을 필요로 할 수도 있다. 따라서 돌발홍수의 위험성 및 적절한 안전수칙에 대한 교육 또한 돌발홍수 예경보 시스템의 일부로서 널리 홍보되어야 한다. ☹

참고문헌

1. 국립방재연구소 (1998). “지리산 일원 호우피해 조사 및 분석”, 행정자치부, pp.89-95.
2. 국립공원관리공단 (2003). “자동우량 경보시설 확충·보상설정에 따른 조사용역.
3. 이종태 (1998). “’98년 홍수 재해 원인과 하천 관리의 문제점”, 수자원학회지, 한국수자원학회, 제31권 제5호, pp.20-32.
4. 이종태 (1999). “’99년 경기 북부의 홍수”, 수자원학회지, 한국수자원학회, 제32권 제5호, pp.20-23.
5. 김홍태 (2005). "GIS기반 지형수문유역모형 개발 및 미계측유역 돌발홍수예측 적용에 관한 연구“, 박사 학위논문, 부산대학교.