

댐 건설전후 유역의 장기유출특성 변화 분석

II. 모형의 매개변수 산정을 통한 유역 장기유출특성 변화 분석

윤용남* · ○김응태** · 강병석** · 김재형*** · 유철상**** · 고익환*****

1. 서론

다목적댐은 이수와 치수목적을 모두 만족시키기 위해 건설된다. 기본적으로 댐 건설에는 댐 건설 당시의 수문특성이 고려되며 이러한 수문특성은 댐건설 이후에도 지속된다는 가정을 가지고 댐 운영에 임하게 된다. 그러나 댐의 건설은 댐 주변의 자연 및 사회 환경의 변화를 유발하게 되고 이는 구체적으로 토지이용의 변화로서 나타난다. 아울러 댐 상류의 경우에 있어서는 개발제한에 따른 식생의 발달 및 댐에 의한 수표면적의 증가를 생각할 수 있고, 댐 하류의 경우 댐의 조절 기능에 따른 하류 홍수량의 변화로 인한 하류하도 및 유황의 변화 등을 살펴볼 수 있다.

본 연구에서는 국지적인 기상의 변화보다는 수문환경의 변화에 초점을 맞추어 댐 건설이후 어떤 수문환경의 변화가 있었으며, 이러한 수문환경의 변화가 유역의 상하류 유출특성에 어떤식으로 영향을 주었는지 정량적으로 살펴보고자 한다. 유출특성 중 홍수유출은 단기간에 일어나는 현상이고 또한 댐 운영으로 인한 인위적인 영향이 주로 반영되므로 여기서는 장기유출특성에 관한 연구로 한정하였다.

국내에 적용된 바 있는 장기유출 해석모형은 TANK, SSARR, NWS-PC 모형 등이 있는데 본 연구에서는 모형의 인지도 및 적용사례의 결과, 모형의 입력자료가 자연환경의 변화를 고려할 수 있는지의 여부, 모형의 입력자료를 지형정보시스템을 이용하여 적절히 추출할 수 있는지의 여부를 고려하여 적합한 모형을 선정하였다. 그 결과 NWS-PC 모형이 한강, 금강 유역에 적용된 사례가 있으며, 매개변수중 일부가 자연환경변화를 잘 고려할 수 있고, 또한 매개변수를 지형정보시스템(GIS)으로부터 적절히 추출할 수 있다는 점에서 본 연구의 댐 건설전·후 장기유출해석에 사용하였다.

2. NWS-PC 모형

2.1 모형의 개요

미국 국립 기상국(National Weather Service)의 수문예측 사업그룹은 강수, 눈의 적설과 용설, 토양 함수상태의 계산, 흐름에 대한 매개변수 최적화 등의 유출예측체계를 모의하는 National Weather Service River Forecast System(NWSRFS, 1991)을 개발하였으며 최근 개인용 컴퓨터의 이용 추세에 맞추어 NWSRFS의 축소 모형인 NWS-PC모형을 개발하였다.

NWS-PC 모형은 크게 토양함수상태계산모형(Sacramento Soil Moisture Accounting Model; SAC-SMA Model)과 흐름에 대한 추적모형으로 구분된다. SAC-SMA의 모형은 수문 순환과정의 지표면부분에 입력된 강우를 하도흐름의 유입량으로 변환시키며 흐름에 대한 추적모형은 운동과 추적법이나 단위도-Muskingum 추적방법의 조합을 이용하여 하도 유입량을 유역 출구의 유출로 변환한다. SAC-SMA모형은 토양을 상층부와 하층부로 구분하고 상/하층부의 수분은 자유로이 이

* 고려대학교 토목환경공학과 교수
** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정
*** 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정
**** 고려대학교 환경공학과 조교수
***** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

동할 수 있는 자유수와 토양입자에 부착된 부착수로 이루어지며 하층부의 자유수는 기저유출을 모의하는 기저 자유수와 최근 강우에 의한 보조 자유수로 구분된다. 모의되는 유출성분은 직접유출, 지표면유출, 중간유출, 보조지하수유출, 기저 지하수유출로 구분되며 처음 3개 성분으로 구성되는 총 하도 유입량은 운동과 추적법이나 단위도-Muskingum 추적방법에 의해 하도추적되며, 마지막 2개 성분으로 구성되는 지표하유출은 선형감쇠가중함수(linear decay weighting function)로 계산한 후 유역출구에서 하도 유입량에 합산된다.

2.2 모형의 적용

2.2.1 소유역 분할

대청댐 유역은 면적 9,886km²의 대유역으로서 남한면적의 1/10정도인 남한 제3의 유역이며 본류의 유로 연장이 393.9km에 이른다. 모형을 적용하기 위한 소유역 분할은 금강홍수통제소에서 적용하고 있는 소유역 분할(건교부, 1995)을 기준으로 하였으며, 수위관측소에서의 유량 검정을 위해 수위관측소가 소유역의 출구에 위치할 수 있도록 조정하였다. 또한 하천차수 2차이상의 하천을 고려하지 못하는 NWS-PC 모형의 제한으로 SAC-SMA 매개변수의 경우 지형특성에 따라 19개의 중간단계 소유역별로 추정하였고, 운동과 추적모형의 매개변수 적용을 위해 1a, 1b, ..., 19a, 19b까지 50개의 세부 소유역으로 재분할하였다.

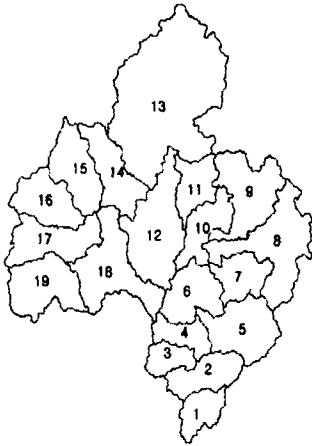


그림 1. 소유역 분류도

으로 판단하여 수동보정을 원칙으로 사용자 매뉴얼의 매개변수 보정지침을 참고하여 매개변수를 보정하였다.

2.2.2 NWS-PC 모형의 매개변수 추정

1) SAC-SMA 모형의 매개변수

모형의 적용에 필요한 SAC-SMA 모형의 매개변수는 총 18개가 있고 매개변수를 추정하는 데는 수문곡선을 이용하는 방법(Burnash, 1973; Peck, 1976)과 유역의 토양의 성질을 분석하여 이용하는 방법(Armstrong, 1978)이 주로 사용된다. 본 연구에서는 개략 토양도, 인공위성영상 등 가용자료를 모두 이용하여 매개변수를 직접 추정하는 방법을 선택하였다. 모형자체에 관측자료를 이용하는 “자동보정” 기능이 있기는 하지만 이 기능을 효과적으로 사용하기 위해서는 유량관측지점을 중심으로 소유역을 분할하여야 하며, 또 2차 하천 이상을 고려할 수 없는 모형의 제약을 고려한다면 연구 대상으로 하는 금강유역의 경우 5-6개의 소유역으로 분할할 수 밖에 없게 된다. 그리고 자동보정기능을 이용할 경우 추정되는 매개변수들에 대한 자연환경의 변화가 적절히 고려될 수 없을 것

2) 흐름추적에 관한 매개변수

흐름해석에 있어서 운동과추적법을 이용하는 경우 총 10개, 단위도-Muskingum 추적법을 이용하는 경우는 총 6개의 매개변수가 필요하게 되는데 본 연구에서는 운동과추적법을 이용하였으며 매개변수의 추정은 지형도, 하천측량성과, 그리고 수치표고모델(DEM) 등을 이용하여 수행하였다.

3) 수문·기상학적인 자료

강우자료는 실측기간 및 결측치 등을 고려하여 유역내에서 신뢰도가 높은 23개의 우량관측소를 선택하고 Thiessen 가중법을 적용하여 19개의 소유역별로 평균강우량을 산정하였다. 잠재증발산량의 경우 청주, 대전, 전주, 보은, 부여, 거창을 포함한 6개소의 기상 관측자료를 이용하였으며 Penman 방법을 적용하여 추정하였으며 각 지점별로 산정된 증발산량 역시 Thiessen 가중법을 적

용하여 19개의 소유역별로 잠재증발산량을 산정하였다. 그리고 실측유량과 관측유량을 비교하기 위한 수위표 지점으로는 댐상류의 용담, 옥천지점과 댐하류의 공주, 규암, 그리고 댐(유입·유출) 지점을 선정하였으며 금강유역 유량 분석 및 홍수조사 (한국수자원공사, 1994)의 수위-유량관계식을 이용하여 수위자료를 유량자료로 변환하여 사용하였다.

3. 금강유역 수문환경의 변화

3.1 토지이용 및 유역 조도계수의 변화

본 연구에서는 댐 건설로 인한 자연환경의 변화를 정량화하기 위하여 댐 건설을 전후하여 10년 주기의 인공위성영상을 분석하였다. 인공위성 영상에서 구한 유역별 토지이용의 형태는 Water, Urban, Forest, Vegetation, Swamp, Bare로 구분되었으며 각각 수표면, 도시(불투수 지역), 삼림, 초지(경작지), 습지, 나대지를 의미한다. 이 중에서 Water와 Swamp는 강우가 저류나 차단에 의한 지체없이 직접 유출에 기여하는 수표면의 면적비율(RIVA)이 되며 PCTIM은 영구불투수지역 면적비율로서 RIVA와 Urban의 합으로 나타나는데 이 두 매개변수는 유출과 비례관계를 가진다. 지표면의 거친 정도를 나타내는 유역의 조도계수는 Water와 Swamp를 제외한 4개 요소를 이용하여 구하는데 유출과는 반비례관계를 가지며 인공위성영상을 이용하여 정량화하였다. 댐 상류유역에서 자연환경의 변화를 고려한 매개변수는 표 1과 같이 댐 건설이후 수표면적의 증가로 댐 상류유역에서 수표면적비율(RIVA)이 증가하고 있으며 불투수면적비율(PCTIM)의 경우 증가양상이 수표면적비율의 증가양상과 비슷한데 그 이유는 댐 상류지역의 경우 대부분 산지이며 댐으로 인하여 도시개발이 제한되어 Urban의 변화가 작았기 때문으로 판단된다. 조도계수의 경우도 증가양상을 보이고 있다.

표 1. 자연환경변화와 관련된 매개변수의 연도별 변화

구분 유역 평균	RIVA			PCTIM			Manning's n		
	74년	85년	95년	74년	85년	95년	74년	85년	95년
	0.009	0.057	0.077	0.018	0.069	0.09	0.351	0.384	0.412

3.2 식생의 변화

표 2. 댐 건설전·후 유역의 NDVI 변화

영상년도	구분	상관거리(m)		
		남-북 (a)	동-서 (b)	조화평균 $\{2ab/(a+b)\}$
1974. 5		13000	19000	15438
1975. 11		13000	18500	15266
1985. 3		24300	21500	22814
1985. 11		23600	26500	24966
1995. 5		24000	25000	24490

유역내 식생의 변화는 인공위성의 영상분석으로부터 개략적인 변화를 추정할 수 있고 아울러 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)자료로부터 식생의 공간적인 특성이 어떻게 변했는지를 간접적으로 추정할 수 있다. NDVI자료의 경우는 식생의 활성화도에 민감하게 반응하므로 식생의 변화와 관련하여 평균적인 개념으로는

사용하기 어렵다. 이는 인공위성의 촬영시점이 같다고 하더라도 기상상태에 따라 식생의 활성화도가 다르게 나타날 수도 있기 때문이다. 그러나 NDVI는 정규화과정(normalization process)을 거친후 식생의 공간적인 특성을 파악하는데 적절히 이용될 수 있다. 식생의 공간적인 특성 변화는 상관거리(correlation length)를 이용하여 정량화될 수 있으며, 상관거리가 길어지면 식생의 균질성(homogeneity)이 커졌다는 것을 의미하고 상관거리가 작아질 경우 식생의 균질성은 떨어져 식생으로 덮였던 지역이 다른 용도로 개발되었다는 것을 간접적으로 보여주게 되는 것이다. 금강유역의 경우 표 2와 같이 댐 건설이후 전반적으로 NDVI의 상관거리가 증가하고 있는데 이것은 댐 건

설로 인한 댐상류의 보호가 적절히 반영된 결과로 사료된다.

4. NWS-PC모형을 이용한 댐 건설 전후의 유출해석

댐 건설 이전의 수문모의는 수문모형이 유역의 특성을 잘 모의할 수 있도록 매개변수의 초기치를 보정하고 모형에 적용하여 댐 건설전 댐 상하류의 유출특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

4.1 토양의 초기 수분상태 결정 및 매개변수의 보정

모형에서 토양의 초기 수분상태를 나타내는 변수들의 결정은 시행착오법(trial and error method)에 의존하게 되는데 본 연구에서는 이러한 상태변수들을 각 최대값의 10%정도를 초기치로 사용했을 경우 관측 유출량과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다(수자원공사, 1997). 그리고 토양의 수분상태를 결정하는 매개변수들과 침투와 유출을 조절하는 매개변수들은 추정치의 최대값 범위내에서 일정비율로 값을 변화시켜가며 모의하였으며, 모의 도중 계산된 수문곡선과 관측된 수문곡선을 계속 비교하면서 그 형상 및 차이에 따라 적절한 매개변수를 보정하였다.

4.2 댐 건설 이전의 유출 해석결과

1974, 1979년의 수문사상을 모의한 결과는 표 3에서와 같이 1974년의 경우 모의결과가 대체로 양호하고 1979년의 경우 용담 및 규암지점이 10~25%정도 과소 모의되는 현상을 보였다.

표 3. 댐 건설이전의 유출해석 결과 비교

연도	구분	용담	공주	규암
74년	계산 평균유량	31.5	188.2	224.7
	유출 침투유량	227.0	2386.0	2990.0
	관측 평균유량	29.7	167.4	222.6
	유출 침투유량	332.0	2883.0	3285.0
79년	계산 평균유량	31.5	242.2	280.4
	유출 침투유량	677.0	3354.0	3857.0
	관측 평균유량	42.3	207.2	313.9
	유출 침투유량	693.0	4318.0	4967.0

이것은 그림 2(a,b)에 나타난 바와 같이 관측치와 계산치의 전반적인 수문곡선의 형상은 일치하나 모형에서 고려되지않은 1, 2, 3월의 강수 등으로 인한 초기 토양함수조건을 충분히 고려하지 못했으므로 초기유출에서 계산유출량이 관측유출량보다 작은 결과를 보여준다. 모형의 초기 상태변수를 보정하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있지만 자연환경을 반영하는 변수의 기타 변수는 연도별로 고정하여 수문모의하기로 가정하였으므로 보정하지 않았다.

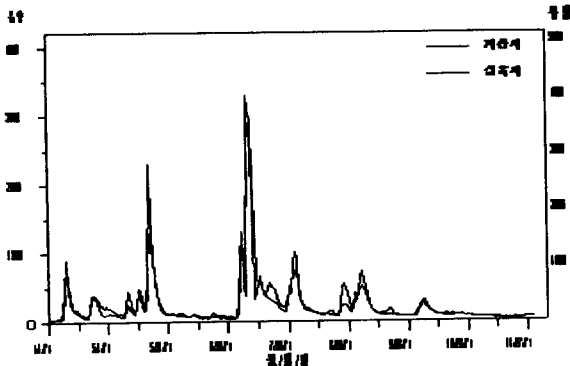


그림 2(a). 댐 건설전 규암지점(1974년)

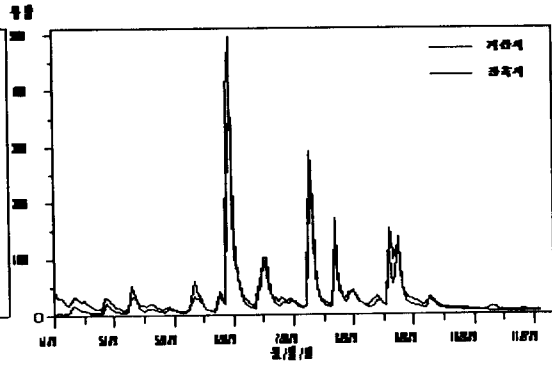


그림 2(b). 댐 건설전 규암지점(1979년)

4.2 댐 건설이후의 장기 유출 해석

댐 건설이후의 유출은 댐에서의 인위적인 조작으로 인해 수문모형에 의한 전체 유역의 정상적인 수문모의가 어렵다. 따라서 유출해석은 댐을 기준으로 상류 및 하류유역으로 구분하여 수행하였다. 댐 상류유역에 대한 유출해석은 댐지점에 대한 유출율의 연도별 변화를 파악하는데 초점을

맞추었으며, 댐 하류유역에 대한 모의는 댐이 건설된 실제의 경우와 댐이 건설되지 않았을 경우로 구분하여, 즉, 댐의 유입량과 유출량을 모형의 입력으로 하여 댐의 역할을 평가하고자 하였다.

4.2.1 댐 상류유역의 유출 변화 분석

댐 건설이후 댐 상류유역의 경우 1985와 1995년도의 인공위성영상 분석 결과를 이용하여 각각 1980년대와 1990년대의 유출을 모의하였다. 표 4의 연도별 유출모의 결과를 보면 평균 관측유출량에 대한 평균 계산유출량의 상대오차가 댐 상류인 용담과 옥천지점에서는 연도별 편차가 크나 댐지점은 1995년을 제외하고는 약 10%이하로 비교적 양호한 결과를 나타내고 있으며, 댐지점에 근접할수록 전반적으로 상대오차가 작아지고 있다. 표 5의 연평균 유출율의 변화추이를 보면 전체적으로 연 강우량이 많으면 증가하고 작으면 감소하는 경향을 보이는 등 연도별 강우의 특성에 따라 편차가 있으나 전체적으로 댐 건설이후 약간의 증가 추세로 보이고 있다. 강우의 영향을 상쇄하기 위하여 유출율을 총강우량으로 나눈 결과에서도 유출율은 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 우기의 영향을 상쇄하기 위하여 월별 총유출량의 합 중에서 최대값으로 각각을 나누어 준 경우에 있어서는 유출율의 증가경향을 판단할 수 없었다.

표 4. 댐 상류에 대한 연도별 유출모의 결과

연도	구분	용담	옥천	댐유입
83	계산평균유량	17.2	-	99.4
	관측평균유량	26.1		100.2
	상대오차	-34.1		-0.8
85	계산평균유량	53.7	-	211.1
	관측평균유량	49.9		195.1
	상대오차	7.6		8.2
87	계산평균유량	42.9	161.4	196.7
	관측평균유량	60.6	140.1	196.2
	상대오차	-29.2	15.2	0.3
89	계산평균유량	34.4	117.9	138.4
	관측평균유량	48.2	145.5	122.9
	상대오차	-28.6	-19.0	12.6
91	계산평균유량	17.3	74.0	88.7
	관측평균유량	43.4	74.7	96.9
	상대오차	-60.1	-0.9	-8.5
93	계산평균유량	12.4	101.5	125.1
	관측평균유량	39.8	93.3	152.0
	상대오차	-68.8	8.8	-17.7
95	계산평균유량	26.6	89.6	110.7
	관측평균유량	21.4	47.0	72.3
	상대오차	24.3	90.7	53.1

주: ① 유량단위는 m^3/sec ② B에 대한 A의 상대오차($RE, \%$)= $(A-B)/B \times 100$ ③ -는 결측년도임

표 5. 댐지점에 대한 연평균 유출율의 변화

구연도	유출율		유출율 총강우량		유출율 월평균유출량 _{MAX}	
	①	②	①	②	①	②
74	0.528	0.528	0.122	0.122	0.068	0.068
79	0.547	0.547	0.105	0.105	0.066	0.066
83	0.516	0.493	0.122	0.117	0.077	0.063
85	0.668	0.652	0.096	0.093	0.050	0.058
87	0.706	0.690	0.113	0.111	0.045	0.040
89	0.629	0.609	0.129	0.125	0.053	0.044
91	0.535	0.502	0.149	0.140	0.092	0.067
93	0.594	0.563	0.126	0.119	0.072	0.052
95	0.598	0.568	0.148	0.140	0.052	0.063

주: ① 해당년의 매개변수로 모의한 결과
② 74년의 매개변수로 모의한 결과

자연환경 변화에 따른 매개변수의 변화가 수문모형 내에서 유출에 미치는 영향을 알아보기 위해 댐 건설 전·후로 매개변수를 구분하여 모의한 결과 댐지점의 평균유입량은 표 6에서 보는 바와 같이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 자연환경 변화가 유출율에 끼친 영향으로 판단되며 댐 건설후에 소폭이지만 유출량이 증가했음을 알 수 있다.

표 6. 자연환경변화에 따른 댐지점 평균유입량의 비교(모의치)

단위 : CMS

구분	83년	85년	87년	89년	91년	93년	95년	평균
NE-○	99.4	211.1	196.7	138.4	88.7	125.1	110.7	138.6
NE-×	95.2	206.4	193.1	134.5	83.0	119.1	105.4	133.8

주: NE-○ : 자연환경변화를 고려한 경우, NE-× : 자연환경변화를 고려하지 않은 경우

4.2.2 갈수기 댐의 역할 평가

표 7. 댐 건설이후 규암지점의 유출분석

구분 연도	I			II			III		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
83	206.1	304.3	1.5	201.2	200.2	1.	241.1	172.4	0.7
85	366.5	533.9	1.5	341.0	399.8	1.2	334.7	359.7	1.1
87	419.6	974.7	2.3	411.5	774.4	1.9	436.8	799.8	1.8
89	255.9	543.6	2.1	249.0	377.3	1.5	225.5	391.2	1.2
91	235.5	356.8	1.5	230.5	296.9	1.3	143.6	205.4	1.4
93	292.9	512.8	1.8	280.4	338.8	1.2	320.6	350.6	1.1
95	253.8	766.1	3.0	228.6	622.4	2.7	226.6	714.6	3.2

주: I : 댐이 없을 경우 모의 유출 II : 댐이 있는 경우 모의 유출 III : 관측유출
①평균유량 ②표준편차 ③변동계수(①/②)

댐 하류에서의 유출 분석을 위해 댐 상류를 가상유역으로 가정하여 모의하였다. 댐 건설전의 경우에는 댐 유입량, 댐 건설후는 댐 방류량이 댐 하류 하도 유입구에 전량 유입되도록 모형을 구성하여 댐 하류로 추적될 수 있도록 하였다. 규암지점에서 댐이 없는 경우와 있는 경우로 나누어 모의한 결과 표 7에서와 같이 하류의 평균유출량이 전반적으로 감소하고 있으며 통계 특성치의 경우 댐이 없을 경우가 댐이 있는 경우보다 변동계수가 크며 댐이 있는 경우가 관측치의 통계 특성과 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 이것은 댐이 저류를 통하여 첨두유출을 감소시키고 갈수시에는 적절한 댐 운영으로 하천 유지유량을 공급하여 유출을 증대시킨 결과로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 댐건설에 따른 유역의 자연환경 변화를 분석하기 위하여 대청댐이 위치한 금강유역에 대하여 댐 건설 전후의 장기유출변화를 모의함으로써 댐 건설이 상하류유역의 유출 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 댐 하류유역에 대한 댐의 역할에 대한 고찰을 하였다.

74, 79년의 강우 및 관측자료를 이용하여 댐 건설 이전의 유출을 모의한 결과 계산유량이 관측유량을 잘 재현하여 주므로 GIS와 인공위성 영상에 의해 매개변수를 판단하여 구성한 수문모형이 유역의 유출 특성을 잘 나타내어 준다고 볼 수 있다.

댐 건설이후의 유출은 댐 상하류로 구분하여 모의하였으며 대략 오차 10% 내외의 모의 결과를 보여주고 있으며 댐 건설로 인하여 댐 하류유역에서 우기의 경우 첨두유출을 감소시켰고 갈수기의 하천유지유량의 유지를 위한 방류로 유량을 증가시킨 댐의 역할을 판단할 수 있었다.

장기적인 관점에서 볼 때 대청댐 건설후 댐 상류지역 유출율의 미소한 증가를 살펴볼 수 있었지만 분석대상연도의 부족으로 이것이 댐건설로 인한 직접적 영향이라고 단정하기는 어렵다. 향후 더 많은 자료가 축적되고 댐 건설이후의 모든 해에 대한 인공위성영상 등의 기초자료가 준비된다면 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 건교부(1995), 금강홍수예경보
한국 수자원 공사(1993), GIS를 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구
한국 수자원 공사(1994), 금강 유역 유량분석 및 홍수조사
한국 수자원 공사(1997), 댐건설 전후의 자연환경변화에 관한 연구
Armstrong, B. L.(1978), *Derivation of initial soil moisture accounting parameters from soil properties for the National Weather Service River Forecasting System*, NOAA Tech. Memo. NWSHYDRO-37, Office of Hydrology, Washington, D. C.
Burnash, R. J. C., R. L. Ferral & R. A. McGuire(1973), *A generalized stream flow simulation system conceptual modeling for digital computers*. National Weather Service, California Dept. of Water Resources.
Engman, E. T., Gurney, R. J.(1991), *Remote Sensing in Hydrology*, Chapman & Hall.
Peck E. L.(1976), *Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast System*, NOAA Tech. Memo. NWS HYDRO-31, Office of Hydrology, Washington D. C.
Tabios III, G., Obeysekera, J.T., Salas, J.D.(1991), *Forecasting and Control of Water resources Systems(NWS-PC Model)*, U. S. National Weather Service Center.