

수자원의 경제적 가치를 고려한 유출량의 평가

강 상 혁*

A Study on Runoff Discharge Considering Economic Value of Water Resource

Sang-Hyeok Kang*

요 약

강원도 지역은 매년 다양한 재해를 반복적으로 겪고 있으며 이러한 재해는 이 지역의 지속적인 발전에 장애요인이 되고 있다. 특히 2002년 태풍 루사에 의한 집중호우는 막대한 피해와 더불어 우리사회의 많은 교훈을 남겼다. 본 연구에서는 홍수 유출량을 경제적 관점에서 평가함으로써 수자원 관리의 중요성을 부각하고자 하였다. 그 결과 2002년 루사 당시 삼척시 오십천의 홍수유출에 따른 수자원의 경제적 손실은 약 5천 5백만원이 유실된 것으로 분석되었다.

주요어 : 태풍루사, 수자원, 경제적 손실 평가

ABSTRACT : Kangwon province has been suffering from the various types of disasters and these disasters stand in the way to sustainable development. The heavy rainfall by typhoon RUSA in 2002 damaged to property and bodily injury, and gave us a lesson. In this paper the rainfall-runoff was estimated on the viewpoint of economic aspect to give new prominence of water resource management. As a result, it is found that economic loss of water resource in Oship river of Samcheok city due to typhoon Rusa in 2002 was estimated 55,919,850 Won.

Keywords : typhoon RUSA, water resource, economic loss estimates

* 강원대학교 강사(kang7231@hanmail.net)

1. 서 론

우리 나라는 강수량의 시, 공간별 분포의 변화가 심하여 수자원 관리에 어려움을 겪고 있다. 연간 수자원의 부존량을 살펴보면 표 1에 나타낸 바와 같이 우리나라 전체의 연 평균 강수량 1,262mm에 남한 면적, 99,450km²를 곱한 1,276억m³로 증발이나 침투 등으로 인한 손실량 43%을 빼면 하천 유출량은 731억m³(57%)로 추정되고 있다. 그러나 하천 유출량 731억m³의 약 1/3은 평상시에 2/3는 우기(6-9월)인 홍수시에 바다로 흘러가고 이 중의 일부가 하천, 저수지 및 지하수로 이용되고 있다(유철상, 2005). 수자원의 이용현황을 보면 연평균 유출량의 44%인 28,940(×10⁶)톤이 각종 용수로 이용된다. 용도별로 보면 생활용수가 9.2%, 공업용수가 2.8%, 농

업용수가 22.8% 그리고 하천 유지용수가 9.5%로 이용된다. 만약 다목적 댐이 없어서 이를 저장하지 못하면 이용할 수 있는 양은 약 13%인 161억m³에 지나지 않는다(심명필, 2002). 우리나라의 경우 인구증가, 상수도 보급확대 및 경제성장 등의 요인으로 물 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상하고 있다(심명필, 2003). “수자원 장기종합계획(2001-2020)”의 용수공급 전망에 의하면 요금 현실화, 노후관개량, 중수도 및 절수 기기 사용 등의 적극적인 수요관리 시책을 펼쳐 가더라도 2011년에 용수수요량은 370억m³로 증가하며 용수공급량은 352억m³로 약 18억m³의 물 부족이 예상되며 2020년에는 26억m³의 물 부족을 예상하고 있다. 기존댐 연계 운영을 통한 용수공급량 확대와 해수 담수화 사업으로 확보한 신규 수자원을 고려하더라도 2011년에 약 12억m³, 2020년에

<표 1> 우리나라 수자원 현황

유역 구분	연평균 강수량	연평균 유출량 ^A (10 ⁶ 톤)	유출 계수	용수이용 현황(백만톤/년)					이용율 (B/A,%)
				생활용수	공업용수	농업용수	하천유지용수	계 ^B	
한강	1,286	19,385	0.57	2,540	595	1,758	3,059	7,952	41
낙동강	1,166	13,946	0.49	1,278	229	3,431	1,419	6,357	45
금강	1,269	9,205	0.49	330	93	1,844	946	3,213	51
영산강	1,319	2,588	0.57	157	44	924	315	1,440	55
섬진강	1,414	3,831	0.54	32	7	742	173	954	25
안성천	1,277	1,244	0.57	149	50	476	25	700	56
형산강	1,087	648	0.51	75	66	248	72	461	71
삽교천	1,254	1,121	0.55	54	10	587	94	745	66
만경강	1,279	1,084	0.54	115	67	499	63	744	68
동진강	1,314	699	0.53	22	10	458	15	505	72
기타	1,319	14,676	0.60	1,234	650	3,937	48	5,869	40
전체	1,262	65,427	0.55	5,991	1,827	14,910	6,181	23,071	44

18억 m^3 의 물 부족이 발생할 것으로 전망하고 있다. 특히 한강 수계는 북한의 금강산 댐의 건설로 인하여 북한강 수계의 수량 감소로 인한 용수공급의 차질, 수력발전 감소, 호우시 금강산 댐의 홍수 조절 등으로 향후 각종 용수 부족은 심화될 것으로 보고 있다. 수자원의 절대적인 부족현상에도 불구하고 이를 경제적인 관점에서 평가하고자 하는 시도는 매우 제한적으로 진행되어 왔다(김봉구, 1973; 오종석, 1998). 이러한 배경을 토대로 본 연구에서는 강원도의 하천을 대상으로 홍수유출을 경제적 측면에서 살펴보고 향후 적정 물관리 대책에 유의한 정보를 제공하고자 한다.

2. 연구 대상지역의 현황

연구 대상지인 삼척시 오십천은 시가지 중심부는 지방 1급하천이고 상류는 지방 2급하천으로 구성되어 있다. 유역 면적은 392 km^2 이고 하천 연장은 약 57 km 이다. 오십천 유역은 전형적으로 하상경사가 크고 협곡을 이루는 산지하천의 형상을 띠고 있으며, 유로연장이 짧은 편이며 유로의 형상 역시 만곡반경이 심한 만곡유로를 형성하고 있는 지역이다. 이러한 유역의 지형은 집중강우 발생 시 수위가 급증하고 강우종료 후 단시간 내에 수위가 급격히 감소하는 특징을 보인다.

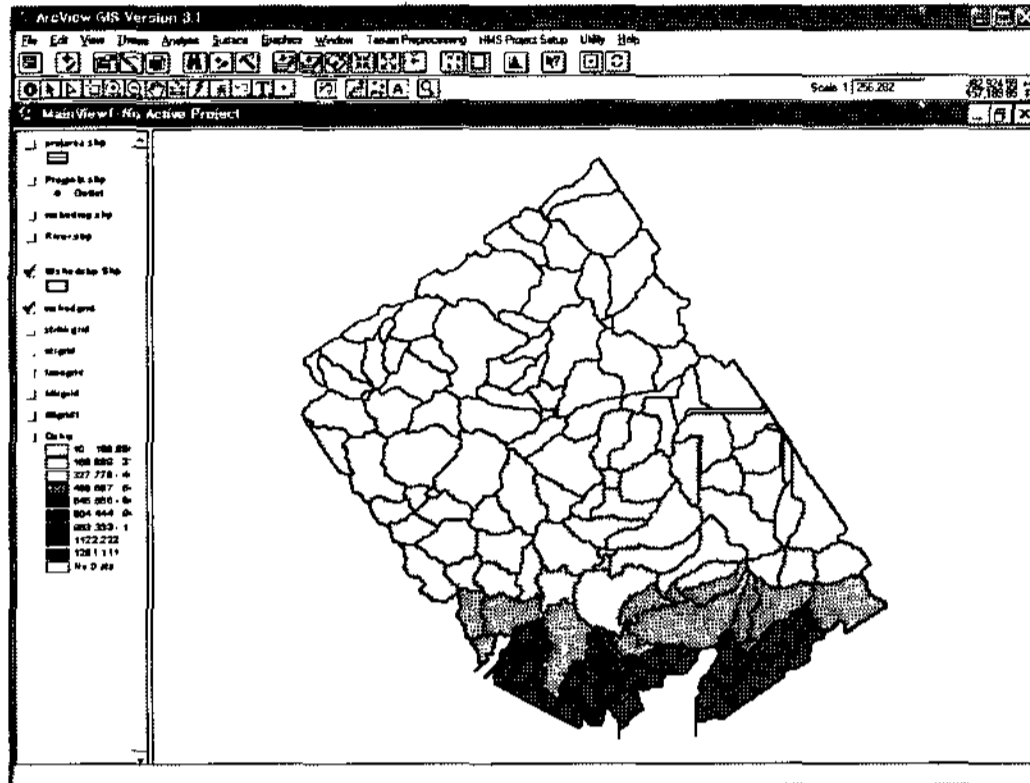
3. 유역 정보의 추출

3.1 수문지형정보의 추출

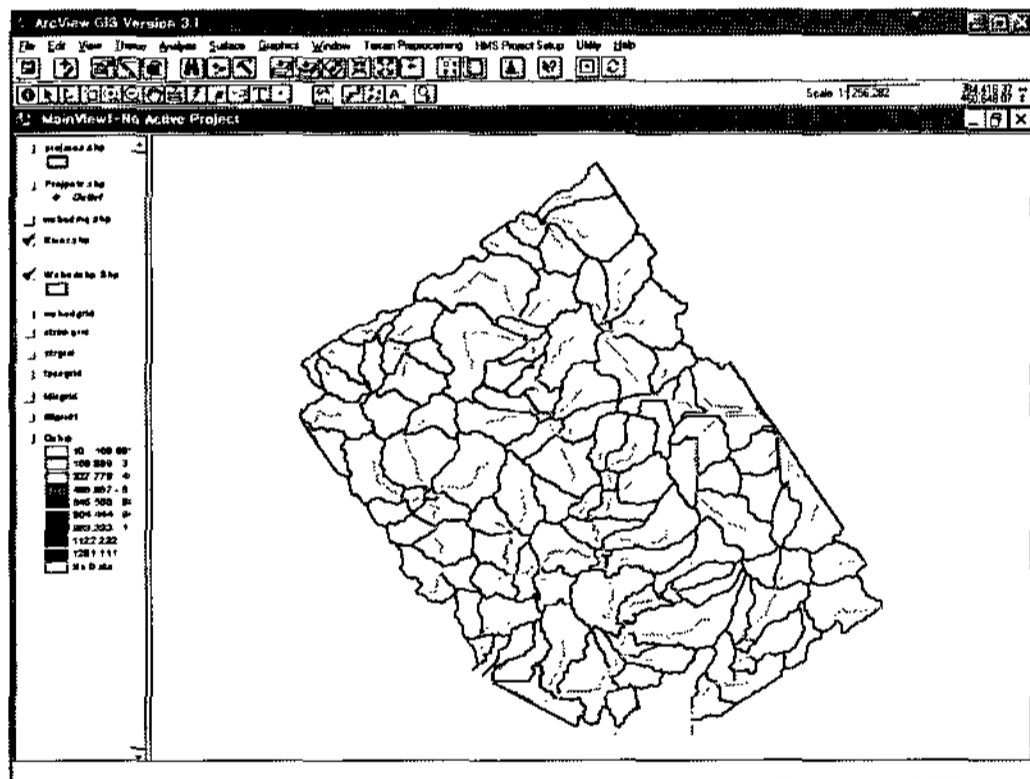
수문모형을 이용한 설계홍수량을 모의하기 위하여 국가지리정보시스템에서 제공하는 1/25,000의 수치지도를 이용하여 유역의 매개변수를 산정하였다. 매개변수를 구하기 위해 HEC-geoRAS를 이용하여 DEM 자료를 추출하여 대상유역의 표고와 경사를 산정하였다. DEM자료를 이용하여 하천을 추출하는 과정은 채움 과정, 물 흐름도 작성 과정, 흐름도의 집중화 과정 등으로 구성된다. DEM을 생성하기 위해 자료를 보간하고 조합하는 과정에서 생긴 움푹 패인 함몰 지형이 존재한다. 이러한 함몰 지형은 하천의 진행흐름을 방해하는데 이러한 부분적인 지형을 검사하여 제거하는 과정을 채움 과정이라 한다. 채움 과정에서는 처리하고자 하는 셀의 표고 값을 그 셀을 둘러싸고 있는 주위 셀 중 가장 낮은 표고를 갖는 셀의 값까지 표고를 조정함으로써 하천의 흐름을 진행시키는 역할을 한다. 채움 과정을 거친 DEM Grid의 각각의 셀에 방향을 결정하여 고유값을 기록하는 과정을 흐름 방향도 설정 과정이라 한다. 그리고 흐름도 집중화 과정은 상대적으로 표고가 낮은 임의의 셀로 유입되는 상류방향의 셀 숫자를 결정하는 과정이다. 각각의 셀에 할당된 값은 다음 단계인 하천을 추출하는데 이용된다. 이러한 각각의 과정을 수행한 후 하천을 추출하였다. 유역 내의 물은 최종적으로 하나의 유출구로 유입되기

때문에 유출구로부터 주위 셀의 경사를 역 추적하여 유역을 추출하였다. 이와 같

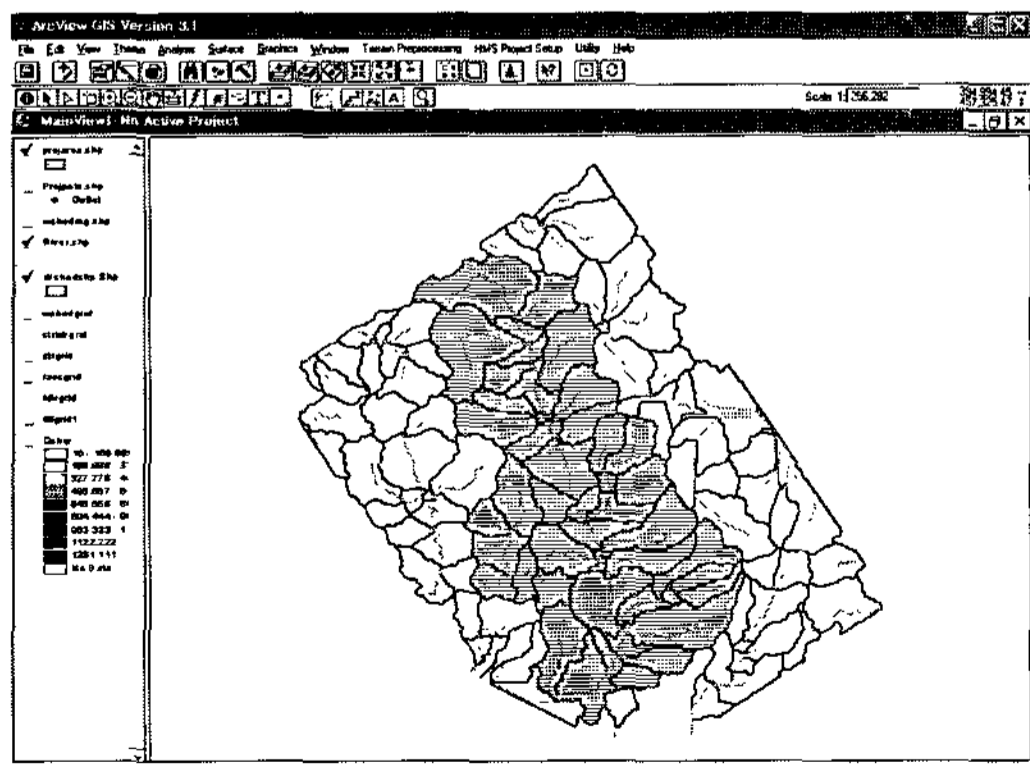
은 과정을 전체적으로 나타내면 그림 1-4와 같다.



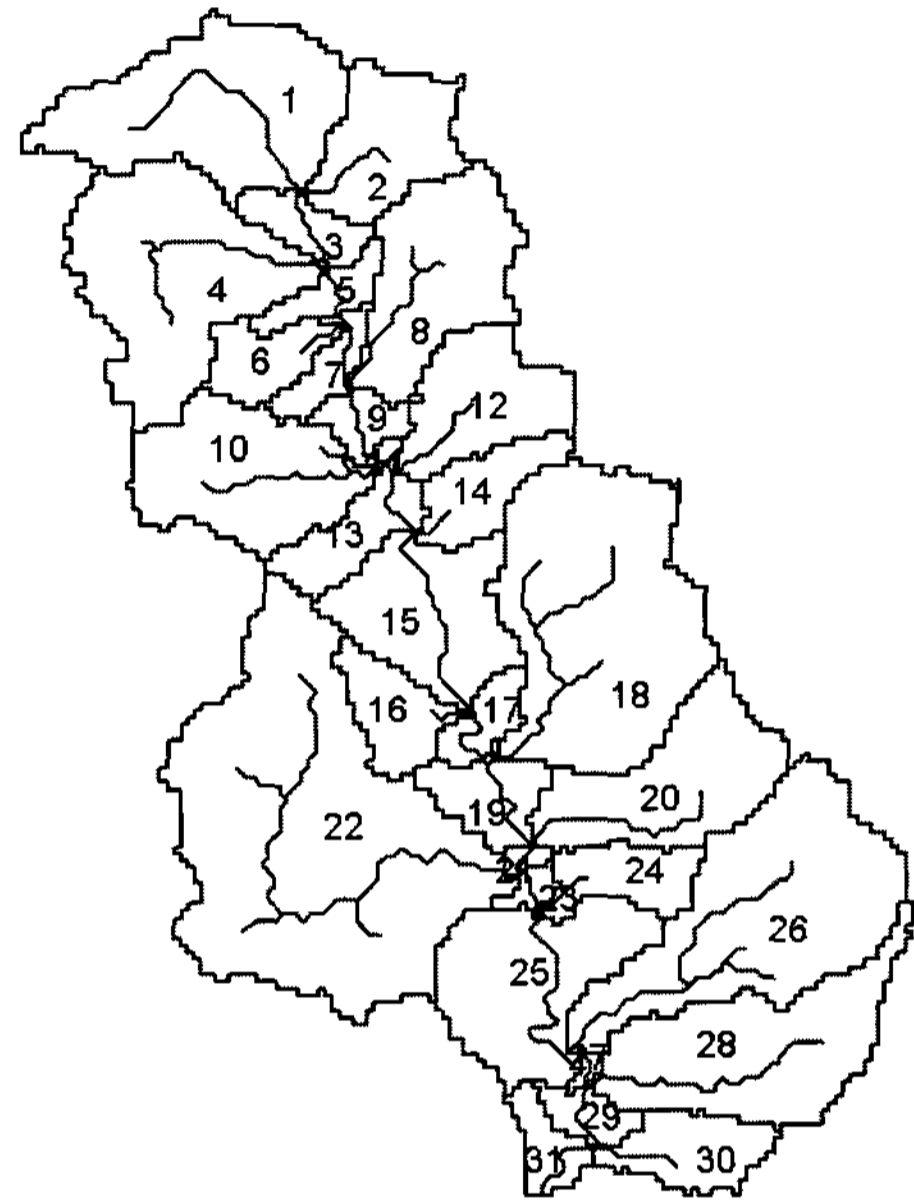
[그림 1] 폴리곤 추출 과정



[그림 2] 하천추출 과정



[그림 3] 삼척 오십천 유역추출 과정



[그림 4] K-W모형 적용을 위한 순서도

3.2 모형입력 인자의 결정

강우 유출과정을 모의 계산하는 kinematic wave(K-W)방법의 경우 다양한 계수를 필요로 하게 되는데 우리나라의 경우 적절한 실측자료가 부족하여 경험적인 방법에 의하여 각각의 계수를 구하는 것이 어렵다. 모형의 입력 계수 중에서 유역 형상에 따른 물리적인 매개변수는 표 2와 같이 3.1절에서 언급한 과정을 통하여 추출하였고 그 밖의 계수는 실측값에 따른 시행 오차법으로 구하였다. K-W방법의 구체적인 해석해의 도출은 4장에서 언급하기로 한다.

<표 2> 모형의 입력자료 추출

유역번호	면적(km ²)	평균면적(km ²)	하상경사	하도길이(km)	하도길이(m)
1	24.187	12.094	0.071	10.106	10106
2	11.098	5.549	0.131	5.819	5819
3	3.595	1.798	0.121	3.917	3917
4	25.101	12.551	0.081	10.697	10697
5	3.489	1.745	0.149	3.489	3489
6	5.125	2.563	0.182	4.467	4467
7	2.617	1.309	0.194	3.264	3264
8	16.353	8.177	0.09	7.776	7776
9	2.679	1.340	0.173	3.068	3068
10	17.398	8.699	0.116	7.551	7551
11	0.797	0.399	0.457	0.457	457
12	11.359	5.680	0.143	5.956	5956
13	4.648	2.324	0.14	6.006	6006
14	6.202	3.101	0.16	5.022	5022
15	6.829	3.415	0.095	14.688	14688
16	6.071	3.036	0.111	4.467	4467
17	3.489	1.745	0.118	3.199	3199
18	34.403	17.202	0.089	10.798	10798
19	4.617	2.309	0.086	5.582	5582
20	16.32	8.160	0.099	9.389	9389
21	1.233	0.617	0.179	0.685	685
22	55.685	27.843	0.041	18.063	18063
23	1.669	0.835	0.176	1.306	1306
24	5.875	2.938	0.075	5.807	5807
25	8.648	4.324	0.038	17.691	17691
26	30.323	15.162	0.101	11.988	11988
27	1.053	0.527	0.037	0.522	522
28	21.151	10.576	0.095	11.732	11732
29	2.33	1.165	0.076	2.709	2709
30	6.724	3.362	0.058	5.657	5657
31	3.744	1.872	0.058	3.362	3362

4. 홍수유출 계산

弘. 1991; 高崎 忠勝외, 2006)

4.1 특성 방정식과에 의한 홍수추적

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (0 \leq x \leq L) \quad (1)$$

사면류에 관한 kinematic wave법의 기초

$$q = \alpha h^m \quad (2)$$

식은 다음과 같다(角屋陸외, 1972; 北川勝

여기서 t 는 시간, x 는 사면 상류단으로부터의 거리, h 는 수심, q 는 사면의 단위 폭당 유량, r_e 는 유효강우, L 은 사면장, α , m 은 각각 흐름의 형상을 결정하는 계수로써 다음의 Manning의 저항법칙을 이용하여 사면류 정수를 구한다.

$$\alpha = \frac{\sqrt{i}}{N}, m = \frac{5}{3} \quad (3)$$

여기서 i 는 사면구배, N 은 사면의 등가 조도계수

식 (1)은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dq}{dh} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = m\alpha h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = r_e$$

상기의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dx}{m\alpha h^{m-1}} = \frac{dt}{1} = \frac{dh}{r_e} \quad (4)$$

$r_e \neq 0$ 일 경우, 식 (4)는 이하의 3개 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = m\alpha h^{m-1} \quad (5)$$

$$r_e dt = dh \quad (6)$$

$$r_e dx = m\alpha h^{m-1} dh = dq \quad (7)$$

$r_e = 0$ 의 경우는 식(5)만 성립한다. 이들 식(4) 또는 식 (5)-(7)로 표현되는 특성곡선을 시간 간격 Δt 로 다음과 같이 차별화한다.

$r_e \neq 0$ 일 경우, 식 (6), (7)로부터

$$r_{ej} \Delta t = h_j - h_{j-1}$$

$r_{ej} \Delta x_j = q_j - q_{j-1}$ 가 얻어진다. 여기서 $j-1$ 는 시점을 나타내며 대상이 되는 우수류가 사면 상류단을 출발해서부터의 경과시간을 나타낸다. Δx_j 는 대상이 되는 특성 곡선상에서 시점 $j-1 \sim j$ 의 Δt 시간 내에 우수류가 전파한 거리를 나타낸다.

상기 두 개 식을 $h_j, q_j, \Delta x_j$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_j &= h_{j-1} + r_{ej} \Delta t \\ q_j &= \alpha h_j^m = \alpha \{h_{j-1} + r_{ej} \Delta t\}^m \\ &= \alpha \left[\left(\frac{q_{j-1}}{\alpha} \right)^{1/m} + r_{ej} \Delta t \right]^m \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta x_j = \frac{q_j - q_{j-1}}{r_{ej}} \quad (9)$$

$r_e = 0$ 의 경우 무강우 시는 수심 h 및 q 에 변화하지 않으므로,

$$h_j = h_{j-1}, q_j = q_{j-1} \quad (10)$$

가 성립한다. 또한 $r_e = 0$ 의 경우 특성방정식 식 (5)만 성립하므로 이를 이용하여 다음 식이 얻어진다.

$$\Delta x_j = m\alpha h_j^{m-1} \Delta t = m\alpha^{1/m} q_j^{(1-\frac{1}{m})} \Delta t \quad (11)$$

사면 상류단을 출발한 우수류의 시점 j 에 있어서 전파거리 X_j 는 식 (9) 또는 식 (11)을 이용하여 구해진 ΔX_j 를 다음과 같

이 순차적으로 적산하여 구한다.

$$X_j = X_{j-1} + \Delta x_j \quad (12)$$

4.2 사면 하류단 홍수류의 도착

어느 지점 n 에서 누적 거리 X_n 이 사면 장 L 을 초과하는 경우, 즉 $X_n > L$ 또는 $X_{n-1} \leq L$ 이 된 경우에 해당된다. 이 경우 우수류는 시점 $n-1 \sim n$ 의 기간내에 사면 하류단에 도착해 있는 것이 된다. $J=n-1$ 의 시점에 있어서 우수류의 선단과 하류 단과의 거리 ΔX_e 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta x_e = L - X_{n-1} \quad (13)$$

사면 하류단에 있어서 사면 단위폭당 유량을 q_e , 시점 $n-1$ 로부터 우수류의 사면하류단까지의 도달 소요시간 Δt_e 는 이 ΔX_e 를 이용하여 식 (8)-식 (11)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$r_{en} \neq 0$ 의 경우,

$$q_e = q_{n-1} + r_{en} \Delta x_e \quad (14)$$

$$\Delta t_e = \frac{h_e - h_{n-1}}{r_{en}} = \frac{1}{\alpha^{1/m} r_{en}} (q_e^{1/m} - q_{n-1}^{1/m}) \quad (15)$$

$r_{en} = 0$ 의 경우,

$$q_e = q_{n-1} \quad (16)$$

$$\Delta t_e = \frac{\Delta x_e}{m \alpha^{1/m} q_e \left(1 - \frac{1}{m}\right)} \quad (17)$$

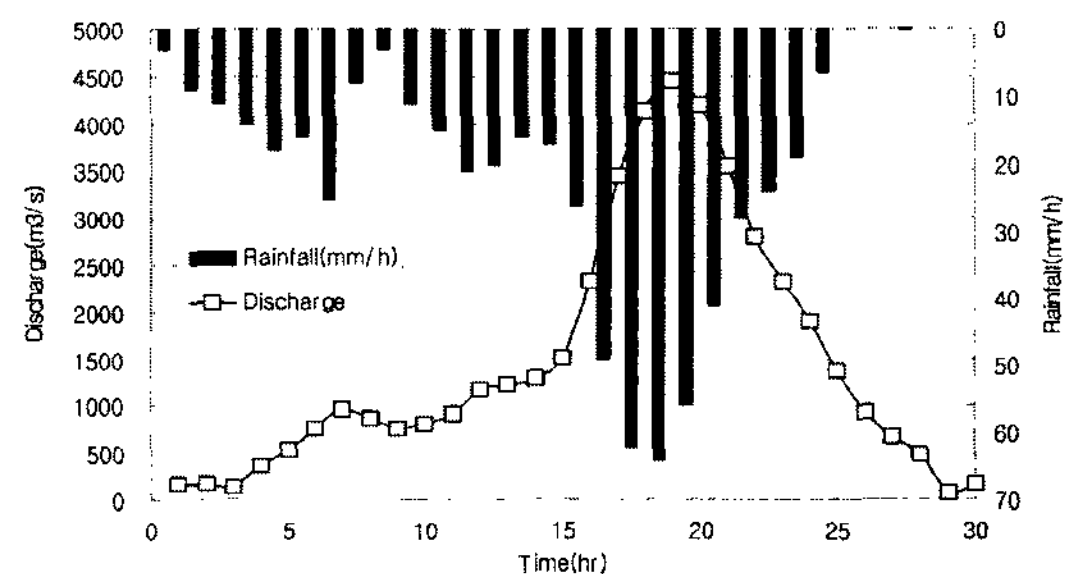
따라서 이 우수류가 사면 상류단을 시각 i 에 출발했다고 하면 사면 하류단에 도달하는 시각 T_e 는 이하와 같이 된다.

$$T_e = (i + n - 1)\Delta t + \Delta t_e \quad (18)$$

5. 홍수 유출량 및 경제적 가치

5.1 유출량의 계산

K-W매개변수의 도출(3장 참조)과 이를 이용한 모형(4장 참조)을 이용하여 2002년 8월 31일부터 9월 1일 사이에 발생한 태풍 루사에 대해 오십천 유역 강우자료를 적용하여 산정한 홍수유출량을 정리하면 그림 5와 같다. 오십천 유역 평균을 이용한 첨두홍수량은 4,452CMS로 계산되었으며 이는 당시 홍수흔적 수위를 이용한 유출량과 유사한 것으로 나타났다.



[그림 5] 시간별 유출량(오십천 유역평균 강우량 적용)

5.2 전 유출량의 계산 및 경제적 손실

우리나라는 표 3에 나타낸 바와 같이 일당 물사용량은 374L/day로 이는 일본, 영국, 및 프랑스보다는 많지만 이탈리아,

<표 3> 각국의 물사용량 및 수도요금 현황

	일본	영국	프랑스	이탈리아	호주	한국
물사용량 (L/day)	357	323	281	383	480	374
수도요금 (원/톤)	1,590	1,897	2,101	670	1,003	349

<표 4> 강우 유출에 따른 경제적 손실량 추정

일시	강우 유출량 및 경제적 손실		
	초당 유출량 (m ³ /s)	시간당 유출량 (m ³ /h)	경제적 손실* (원/톤)
8/31 1시	173	622,800	217,357
8/31 2시	173	622,800	217,357
8/31 3시	134	482,400	168,358
8/31 4시	369	1,328,400	463,612
8/31 5시	526	1,893,600	660,866
8/31 6시	763	2,746,800	958,633
8/31 7시	956	3,441,600	1,201,118
8/31 8시	876	3,153,600	1,100,606
8/31 9시	763	2,746,800	958,633
8/31 10시	811	2,919,600	1,018,940
8/31 11시	910	3,276,000	1,143,324
8/31 12시	1,170	4,212,000	1,469,988
8/31 13시	1,235	4,446,000	1,551,654
8/31 14시	1,302	4,687,200	1,635,833
8/31 15시	1,513	5,446,800	1,900,933
8/31 16시	2,332	8,395,200	2,929,925
8/31 17시	3,438	12,376,800	4,319,503
8/31 18시	4,132	14,875,200	5,191,445
8/31 19시	4,452	16,027,200	5,593,493
8/31 20시	4,193	15,094,800	5,268,085
8/31 21시	3,549	12,776,400	4,458,964
8/31 22시	2,808	10,108,800	3,527,971
8/31 23시	2,332	8,395,200	2,929,925
8/31 24시	1,900	6,840,000	2,387,160
9/1 1시	1,370	4,932,000	1,721,268
9/1 2시	927	3,337,200	1,164,683
9/1 3시	663	2,386,800	832,993
9/1 4시	484	1,742,400	608,098
9/1 5시	81	291,600	101,768
9/1 6시	173	622,800	217,357
계	44,338	159,606,003	55,702,493

호주에 비해서는 적은 물 사용량을 나타내고 있다. 그러나 수도요금은 이들 국가에 비해 적게는 약 2배 많게는 7배 정도 비용이 저렴하여 수도물에 대한 인식은 상대적으로 큰 비용이 들지 않는 것으로 생각할 수 있다. 연구 대상 유역의 최근 10년간 평균 강우량은 1,524mm/yr로 2002년 8월31일에서 9월 1일에 걸쳐 태풍 루사에 따른 강우량은 579mm로 연 평균의 37.9%가 28시간에 내렸다. 동 태풍에 따른 시간당 유출량은 표 4에 나타난 바와 같이 160,228,800 m³/h로 이를 수도물 값으로 환산하면 55,919,850원이 28시간의 집중호우로 인하여 바다로 유실된 것이 된다.

6. 결 론

우리나라의 강우특성으로 연간 강우량의 2/3가 홍수기인 6-9월의 장마와 태풍기간에 집중되고 갈수기인 11월부터 익년 4월까지 6개월은 1/5에 불과하여 연중 일정한 강수량을 가지는 외국과는 다르게 하천이나 강을 효율적으로 이용하여야 한다. 따라서 댐건설, 수질오염, 그리고 각종 규제 등 상, 하류간의 갈등문제를 원활히 해결해야 하는 부담이 커지고 있다. 상, 하류간의 물분쟁은 이미 여러 곳에서 발생하고 있고 앞으로는 더욱 증가할 전

*시간당 유출량을 수도요금으로 환산한 값으로 수도요금이 낮게 설정되어 있으므로 실질적인 경제손실은 이 금액보다 낮게 평가될 수 있음

망이다. 우리 나라의 1인당 물사용량은 선진 외국에 비하여 큰 차이가 없으므로 평균 수도 요금은 선진 외국의 1/2에서 1/7 밖에 되지 않아 수돗물의 낭비 요인으로 작용하고 있으며 2001년을 기준으로 한 수돗물의 판매원가는 490원/m³로 생산단가 569원/m³의 약 86%에 불과하다. 본 연구에서는 삼척시 오십천을 대상으로 먼저 GIS를 이용하여 수문 유출 변화인자를 정량적으로 분석하여 강우유출 모형을 구성함으로써 2002년 루사 당시 홍수유량을 정량적으로 구하였다. 이러한 유출량은 시, 공간적인 불균형으로 인하여 수자원의 가치 손실량으로 보았으며 향후 도래하는 물부족 상황을 고려하여 주요 시책의 참고로 활용되고자 한다.

참고문헌

건설교통부, 2001, 수자원 장기종합계획(2001-2021)

- 김봉구, 1973, 토지 및 수자원 개발전략평가를 위한 경제적 분석 방법, 농업경제연구 제 15권.
- 심명필, 2002, “수자원 개발에 따른 주변지역 지원현황과 확대방안”, 한국 수자원학회지, 제 35권 제 1호, pp.35-50.
- 심명필, 2003, “수자원 경제성 분석 입문”, 한국 수자원학회지, 제 36권 제 3호, pp.74-85.
- 오종석, 1998, 수자원 개발사업의 경제적 타당성분석에 관한 연구, 고려대학교 석사논문
- 유철상, 2005, “수자원의 공간적 재분배에 관한 고찰”, 대한토목학회지, 제 53권 제 12호 pp.222-232.
- 角屋陸외, 1972, “丘陵地の 住宅開發に伴う流出變化の豫測(2)”, 제 9回自然災害科學 綜合シンポジウム論文集.
- 北川勝弘. 1991. “山岳林地域における地形解析に関する基礎的 研究”. 名大演報 11, pp. 39-192
- 高崎 忠勝외, 2006, “都市 中小河川에 있어서 集中豪雨時의 洪水流出特性”, 일본 토목학회 수공학논문집, 제50권, pp.343-348.