

# 미래지향적이고 소하천 치수계획을 위한 소고



오경두 ▶▶

육군사관학교 토목환경학과 교수  
한국물모형 기술위원회 부위원장  
한국수자원학회 수자원분과 위원장  
okd0629@kma.ac.kr

## 1. 서언

최근 우리나라 치수정책의 변천 과정은 그림 1.1과 같이 정리할 수 있다. 과거 하천정비기본계획을 치수계획의 전부인 것처럼 생각하던 시절이 있었다. 그러나 최근들어 하천정비기본계획으로는 감당할 수 없는 이상강우와 극한홍수가 빈발하면서 2001년 유역종합치수계획을 도입하기에 이르렀다. 유역종합치수계획

을 시발점으로 과거 제방 위주의 선적(線的)인 치수정책에서 탈피하여 유역 전체를 일관하는 면적(面的)인 홍수방어계획을 수립하기에 이르렀다.

그리고 2007년 홍수량 할당제를 하천법에 도입하여 홍수량 총량관리체제로 전환하면서 날로 악화되어 가는 유역의 건전성을 회복하는 근원적인 치유 정책으로 눈을 돌리기 시작하였다. 유역 건전성을 회복하는 것이 하천 건전성을 유지하는 시발점이 됨은 당연한 사실이다. 2008년에는 구간별로 나누어 수립하던 하천정비기본계획을 권역별로 수립하도록 함으로써 물길이 통합된 수계 일관 치수계획 수립을 지향하기에 이르렀다. 그러나 우리 학계에서는 이러한 정책 변화를 뒷받침할 만한 연구가 거의 없었다고 해도 과언이 아니다. 본고에서는 극한 홍수 대비, 유역 건전성 회복, 물길이 통합된 유역관리체계 구축 등 최근 우리나라 치수정책의 큰 흐름 중에서 유역 건전성 회복을 위한 유역관리지표 도입 방안과 통합 유역관리체계 구축을 위한 수문학적 접근방법에 대해 고찰하고 특히 소하천을 중심으로 문제점과 이를 해결하기 위한 방안을 살펴보고자 한다.

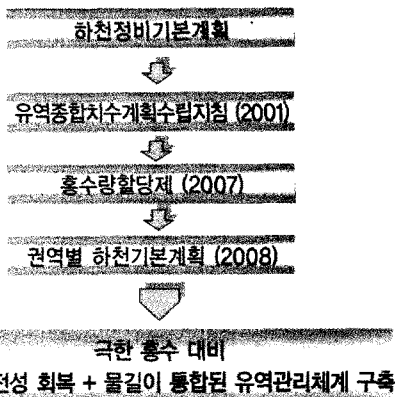


그림 1.1 우리나라 치수정책의 흐름(오경두, 2009)

## 2. 유역 건전성 회복을 위한 유역관리지표 도입 방안

정부에서 홍수량 할당제를 추진하게 된 근본적인 이유는 유역 건전성 회복에 있다고 하겠다. 무분별한 개발은 유역의 수문순환체계에 큰 혼란을 초래하며 그 결과 홍수량이 급격히 증가하고 도시하천의 세굴과 침식 그리고 퇴적의 악순환이 심화되고 지하수의 고갈로 도시하천의 건전화와 이로 인한 하천 생태계의 파괴로 이어지고 있다.

그러나 그동안 수자원기술자에게 유역은 유역면적과 도달시간, 저류상수, 유출곡선지수(CN) 등 홍수량을 계산하여 수공구조물을 설치하고 침수범람을 모의하는 대상 이상의 큰 의미가 없었다고 해도 과언이 아니다. 유역종합치수계획에서는 '유역의 기초자료 조사' 편에서 '토지이용 현황조사'를 실시한다. 그 내용을 살펴보면 대체로 시도 단위 행정구역이나 전체 대유역에 대하여 대략 1980년대부터 2000년대까지 5년 단위로 토지이용 변화를 시가화건조지역(또는 도심지), 농경지(또는 논, 밭으로 세분하기도 함), 산림, 초지, 나대지, 수역 등으로 구분하여 그림이나 표로 제시하고 있다. 그리고 나서 가장 최근 토지피복도를 이용하여 유효유량 산정을 위한 유출곡선지수(CN)를 구하면 끝이다. 그 뿐이다. 홍수량 계산을 위한 유출곡선지수를 얻었으니 이제 더 이상 유역 자체의 변화에 대해서는 별다른 관심이 없다.

유역종합치수계획에서 홍수량을 할당하여 홍수량 총량관리를 추진하게 된 직접적인 배경은 최근 급증하고 있는 도시유역 침수피해이며, 그 주요 원인 중에 하나가 도시화로 인한 불투수면적의 증가이다. 유역개발로 인한 불투수면적의 증가와 이로 인한 유출증가는 인위적인 요인으로서 원인자부담원칙의 적용이 타당하며 홍수량 총량관리의 대상이 되어 마땅할 것이다.

도시화에 따른 불투수면적의 증가는 홍수도달시간의 감소와 유출계수의 증가에 따른 침투유량과 유출총량의 증가를 초래하게 된다. 그러나 침투유량과 유

출총량은 불투수면적 외에도 확률강우량 증가, 빈도의 상향 조정, 홍수량 산정 방법의 차이 등으로 인하여 달라질 수 있으므로 유역관리를 위한 객관적인 지표로 채택하기에는 어려움이 있다.

유역관리를 위한 지표로서 불투수면지표를 개발하여 적용하는 방안이 연구된 바 있다. 불투수면지표는 도시화로 인한 영향을 가장 잘 반영하는 지표 중 하나이다. 그러나 본고에서 홍수량 총량관리를 위한 유역관리지표로서 불투수면지표 보다 유출계수지표를 제안하는 이유 중에 하나는 불투수면은 도시화로 인한 영향을 반영 하는 데는 적합하지만 도시화 이외의 요인으로 인한 유역의 수문학적 변화를 평가 하는 데는 적합하지 않기 때문이다. 예를 들어 산림지가 농경지로 개발된다든가 농경지가 초지나 나대지로 바뀌는 경우 수문학적으로 큰 변화가 발생하게 되는데 불투수면지표는 이를 반영할 수 없지만 유출계수지표는 이러한 수문학적 변화를 반영할 수 있다.

그리고 유역관리지표로서 불투수면지표 보다 유출계수지표를 제안한 또 다른 이유는 유출계수는 불투수면 보다도 더 직접적으로 홍수량 관리에 연관되어 있기 때문이다. 예를 들어 이미 도시화되어 불투수면으로 분류되어 있는 용지라 하더라도 유역관리 노력에 따라 홍수유출 저감에 기여할 수 있기 때문이다. 지붕은 완벽한 불투수면이지만 여기에 화단을 조성한다면 빗물 저장시설을 설치하여 유출률을 저감할 수 있다. 이 경우 지붕에 대한 유출계수 저감효과를 유역관리지표에 반영할 수 있을 것이다. 이와 같이 유역 관리자의 유출저감을 위한 다양한 노력(예를 들면 투수성 포장, 녹지공원 조성, 저류지, 빗물 저장시설 등)을 유출계수지표에 반영하도록 하고 이러한 유출계수 저감사업에 대하여 해당 사업자나 지자체 등에 인센티브를 부여하는 방안도 검토해 나가야 할 것이다.

보통 유출계수는 일정한 범위로 주어지며 재현 기간, 적용 면적, 경사도, 연평균 강우량 등에 따라 영향을 받게 된다. 그러나 본고에서는 표 2.1과 같이 토지이용 형태별로 대표적인 하나의 값을 채택하여 유

표 2.1 토지이용 형태별 유출계수

구분	토지이용 형태	유출계수(%) <sup>1)</sup>
1	수역	100
2	시가화 건조지역	70
3	나지	40
4	습지	100
5	초지	35
6	산림지	18
7	농지	30

출계수지표를 적용하는 방안을 제시하기로 한다<sup>2)</sup>.

그림 2.1은 우리나라 중권역 전체, 한강수계, 중랑천유역의 90년대 유출계수지표와 80년대와 비교한 유출계수지표의 변화를 나타낸 것이다. 중권역에서는 서해안과 남해안의 유출계수지표가 높은 반면 내륙과 동해안지역은 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 한강수계에서는 남한강 중류와 임진강 중하류부 및 한강 하류부의 유출계수지표가 크게 나타나고 있다. 중랑천유역은 하류부의 유출계수지표가 크게 나타나고 있다. 그리고 유출계수지표의 변화를 살펴보면 중권역에서는 서해안과 내륙, 제주도에서 일부 유출계수지표가 감소한 권역이 있으나 유출계수지표가 증가한 권역이 훨씬 더 많은 것을 알 수 있다. 한강수계에서도 남한강 상류, 북한강 상류, 임진강 상류와 한강 하류 일부지역의 유출계수지표가 감소하였으나 유출계수지표가 증가한 유역이 더 많음을 알 수 있다.

중랑천유역의 경우 유역 하류에 위치하여 유출계수지표가 매우 높은 종로구와 동대문구, 성동구 지역의 유출계수는 오히려 감소한 반면 중랑구와 노원구, 의정부시, 양주시 지역은 유출계수가 증가하였음을 알 수 있다. 특히, 의정부시 지역에는 13%나 유출계수가 증가한 유역이 보인다. 이것은 고도로 도시화된 지역에서는 최근들어 녹지 등이 증가한 반면에 기존

에 농지나 녹지였던 지역들이 급속하게 도시로 개발되고 있기 때문이다. 그리고 중랑천 유역 하구부에 위치한 종로구와 동대문구, 성동구 지역의 유출계수가 다소 감소하였으나 여전히 가장 높은 유출계수를 나타내는 지역임을 알 수 있다.

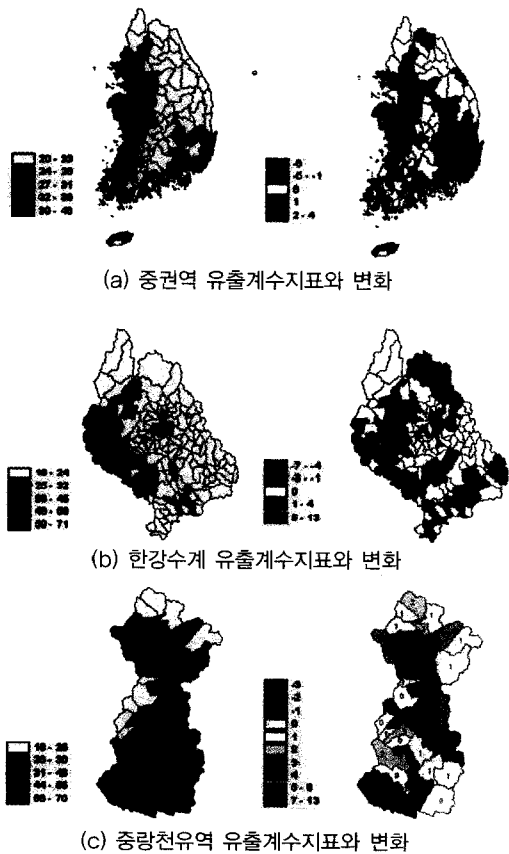


그림 2.1 유출계수지표의 변화

유출계수지표의 통계치를 중권역 전체, 한강수계, 중랑천유역에 대하여 정리하면 표 2.2와 같다.

1) 유출계수는 한 유역 내에 내린 강수량과 하천이나 하수관거에 유입하는 우수유출량의 비율로서 0에서 1 사이의 값을 갖지만 편의상 100을 곱하여 퍼센트(%) 단위로 취급하기로 한다.  
 2) 본 자료는 저자가 연구책임자로 참여한 「홍수량 할당제 도입에 관한 연구(최종보고서)」(건교부, 2007b)의 일부 내용을 정리한 것임을 밝혀둔다.

표 2.2 유출계수지표 변화

구 분	면 적(km <sup>2</sup> )	평균 유출계수지표(%)			비 고
		80년대	90년대	증 감	
중권역 전체	109,028	24.63	25.07	+0.44	북한지역 포함
한강수계	34,418	22.88	23.22	+0.34	임진강 포함
중랑천유역	300	38.74	40.43	+1.69	도시화유역

중권역 전체의 평균 유출계수지표는 10년 동안 24.63%에서 25.07%로 0.44% 증가한 것으로 나타났다. 한편, 북한지역에 걸쳐 분포하고 있는 임진강과 북한강이 포함된 한강수계는 22.88%에서 23.22%로 0.34% 증가했으며, 중권역 전체에 비하여 약 2% 정도 유출계수지표가 낮은 것으로 나타났다. 도시화가 활발하게 진행되고 있는 중랑천유역은 10년 사이에 평균 유출계수지표가 1.69%나 크게 증가하여 한강수계 평균 유출계수지표 증가율의 5배 정도로 나타났다. 그리고 평균 유출계수지표도 40.43%로 한강수계 평균 유출계수지표 23.22%의 1.74배로 매우 높게 나타나 도시화된 유역의 특성을 잘 보여주고 있다.

유역개발에 대한 수문학적인 민감도는 유역면적이 작을수록 커지게 된다. 도시화로 인하여 첨두유출량(peak discharge)이 수 배 이상 증가한 사례들도 보고되고 있다. 그림 2.2에서 도시화가 30%에서 52%, 91%로 진행되어 감에 따라 유출율은 54%에서 74%, 89%로 거의 정비례하여 증가하고 있다.

그림 2.3은 도시화된 면적의 비율이 1961년 13%

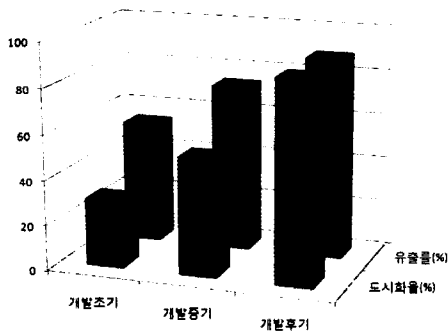


그림 2.2 도시화에 따른 유출률의 변화(출처:산해당, 도 면재작성)

에서, 1969년 27%, 1978년 38%에 이른 유역으로서 2000년에는 64%에 이를 것으로 예상되는 유역이다(일본 건설성 자료로서 자료 작성 시점은 1988년 이전으로 보인다). 도시화에 따른 첨두홍수량의 변화는 1961년 464m<sup>3</sup>/s에서, 1969년 728m<sup>3</sup>/s, 1978년 937m<sup>3</sup>/s, 2000년에는 1,416m<sup>3</sup>/s로 약 30년 사이에 첨두홍수량이 3배나 증가할 것으로 예상하고 있다.

앞으로 유역개발에 대한 요구는 더욱 커져만 갈 것이다. 그린벨트가 풀리고 토지의 용도가 변경되는 등 소하천을 품고 있는 소유역의 수문환경은 갈수록 악화될 가능성이 높다. 수문학적으로 예민한 소유역의 수문순환시스템을 정상적으로 유지하기 위해서는 유출계수지표를 통한 체계적인 유역관리가 더욱 절실히 요구된다. 소하천이 포함된 소유역을 관리하고 있는 지자체에서는 소유역의 유출계수를 증가시키는 각종 개발행위에 대하여 원인자부담원칙에 따라 빗물저류

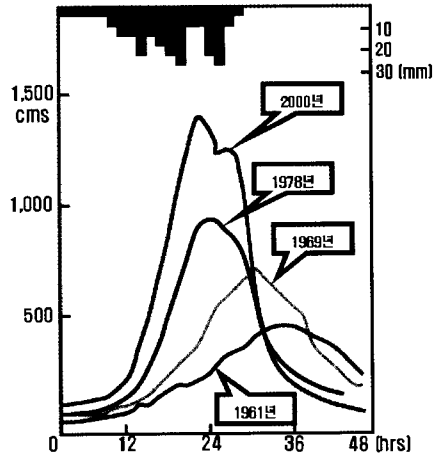


그림 2.3 도시화에 따른 홍수량의 변화(출처:산해당, 도 면재작성)

조, 침투시설, 투수성포장 등을 통하여 증가한 유출 계수를 감소시키도록 조래 등으로 의무화하고 이를 지키지 않을 경우 가칭 홍수부담금을 부과하여 이를 재원으로 지자체에서 직접 유역유출계수를 감소시켜 홍수량 총량관리를 시행하는 방안도 검토해 나가야 할 것이다. 홍수량을 증가시키는 행위는 부메랑이 되어 자신과 이웃에게 직접적인 피해를 가져오게 된다는 사실을 이제는 더 이상 간과할 수 없는 시대에 살게 되었다.

### 3. 유역 상하류■ 일관하는 치수정책 수립

지금까지의 치수정책은 하천의 주요 지점별로 해당 빈도의 홍수량을 산정하여 계획홍수량을 결정하고 이에 따라 하도를 개선하거나 제방을 축조하는 하도 중심의 선적 치수계획이었으며 따라서 하도를 따라 홍수량 산정 지점별로 각각 홍수량을 산정하여 적용해도 아무런 문제가 없었다. 그러나 앞으로의 미래지향적인 치수정책은 유역종합치수계획이나 홍수량 할당과 같이 상류 유역의 토지이용변화나 저류 또는 침투시설 설치 등의 유역관리활동이 해당 지역은 물론 데미지센터(damage center)가 포함된 하류지역에 어떻게 영향을 미치는지 상하류를 일관하는 정량적인 분석을 바탕으로 유역 중심의 면적 치수계획을 수립하는 방향으로 나아가고 있다. 앞으로는 물줄기가 같은 중권역 단위로 상류 소하천에서 하류 중규모 또는 대규모 하천 본류 구간까지 마치 한 방울의 피가 싹틔움에서 정맥을 거쳐 대정맥으로 흘러들어가는 일련의 혈액순환과정처럼 단일 호우로부터 발생한 강우가 유역 상류부터 하구까지 하나의 수문순환시스템을 형성하여 흘러나가는 과정을 종합적으로 일관성 있게 분석하여 치수계획을 수립하도록 요청받고 있다.

그러나 이를 위해서는 강우로부터 홍수량을 계산하는 방법(강우-유출 모의)과 설계강우량 문제가 먼저 해결되어야만 한다. 현재 홍수량을 계산하는데 널리 사용되고 있는 Clark 단위도법을 비롯한 합성 단

위도법을 기반으로 한 HEC-1 모형이나 HEC-HMS 모형 등 집중형 모형(lumped model)은 유역을 작게 세분하면 할수록 유역 하구점의 홍수량이 과도하게 크게 산정되는 스케일 문제(scale problem)가 발생한다. 그래서 정상적으로 유역을 분할할 수 있는 최소 한계를 50~100km<sup>2</sup> 정도로 보고 있다. 그러다 보니 유역종합치수계획 등 국가 기반 치수계획에서는 싹틔움에 해당하는 불과 수 평방킬로미터도 안 되는 지방 2급 하천이나 소하천에 대해서는 홍수량 계산조차 할 수 없다. 결국, 소하천이 포함된 소유역은 홍수량 산정 단계부터 아예 소외될 수 밖에 없는 실정이다.

홍수량을 계산하는데 어려움을 주고 있는 두 번째 문제로 설계강우량을 들 수 있다. 지금까지 적용해 온 면적감소계수(Areal Reduction Factor, ARF) 기반의 설계강우는 홍수량 산정 지점과 지속기간별로 각각 다른 면적감소계수 값을 강우량에 적용하여 강우량에 대한 일종의 디스카운트를 하게 된다. 그런데 이 디스카운트율이 강우가 내리는 집수면적과 강우의 지속기간별로 다르게 적용하도록 되어 있어 문제가 되는 것이다. 홍수량 산정 지점마다 그리고 강우의 지속기간마다 달라지는 설계강우를 적용하다 보니 상하류가 연계된 문제를 해결할 수 없는 지경에 이르게 되었다.

예를 들어 그림 3.1과 같이 유역 상류에 홍수조절용 댐을 계획하고 있다고 가정해보자. 댐의 홍수조절 효과로 댐 하류부 도시지점에서 홍수량이 어떻게 달라질지 강우-유출 모의와 댐 운영 모의를 통해서 검

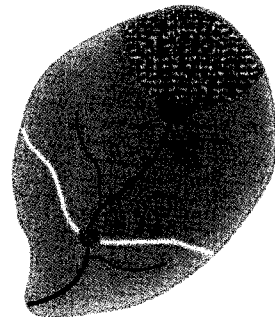


그림 3.1 댐의 홍수조절효과 평가 문제

토하려고 한다.

댐 지점의 집수면적은 600km<sup>2</sup>이고 임계지속기간은 12시간이며, 검토하고자 하는 하류 도시지점의 집수면적은 2,400km<sup>2</sup>이고 임계지속기간은 24시간이라고 하자. 댐 지점의 빈도강우량을 적용해야 할지 유역 하류부 도시지점의 빈도강우량을 적용해야 할지 결정하기 곤란한 문제에 부딪히게 된다. 댐 지점에 대한 빈도강우량을 적용할 경우(당연히 댐 지점의 임계지속기간에 해당하는 12시간 강우량과 집수면적을 고려한 면적감소계수를 적용), 유역 하류부의 홍수량은 물리적인 의미가 없게 된다. 역으로 유역 하류부 도시지점의 빈도강우량을 적용할 경우(이 지점의 임계지속기간 24시간에 해당하는 강우량과 집수면적을 고려한 면적감소계수를 적용), 댐 지점의 홍수량은 물리적인 의미가 없게 된다. 이러한 점(點) 중심의 홍수량 산정 방식은 한강수계와 같이 유역 면적이 광대해질 경우 그 심각성이 더해지게 된다. 예를 들어 남한강 상류에 홍수조절용 댐을 계획하고 있다고 하자. 그 효과가 남한강 본류와 한강 본류를 따라 어떤 영향을 미치는지 검토할 경우에 어떤 강우량과 면적감

소계수를 적용할 것인가? 유역 전체를 아우르는 단일 빈도강우의 적용이 없이는 물줄기가 같은 소하천-중 규모하천-대하천을 일관하는 수문순환과정을 총체적인 단일 시스템으로 해석하여 홍수량을 분석하는 것은 불가능하다. 면적감소계수를 적용하여 구한 강우량은 그 지점의 해당 지속기간에만 적용이 가능한 강우가 되기 때문이다.

우리나라에서 실무에 적용하고 있는 설계강우의 또 다른 심각한 문제는 강우가 시간에 따라 어떤 형태로 내리는지를 결정하는 Huff 분포에 있다. 전체 강우지속기간을 무차원화하여 4분위로 나누었을 때 강도가 강한 강우가 어느 분위에 많이 발생하는지와 해당 지역의 강우에 대한 시간분포를 통계적으로 해석하여 적용한다는 장점 등으로 인하여 1980년대 후반부터 국내에서는 모두 Huff 분포를 적용하게 되었다. 그러나 아이러니하게도 정작 Huff가 살고 있는 미국에서는 예나 지금이나 SCS 분포형을 포함한 교호블록형 강우분포를 적용하고 있다.

Huff 분포의 가장 큰 문제점 중에 하나는 지속기간별 누적최대강우량이 임의적이라는 점이다. 예를

표 3.1 강우의 시간분포모형별 강우강도의 비교(출처: 배덕호 등, 2004)

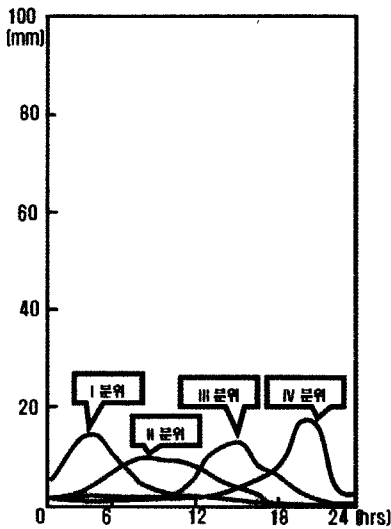
구 분		최대강우강도(mm/hr) <sup>3)</sup>		
		성내유역	반포유역	동의대유역
교호블록	전	219	222	201
	중	219	222	201
	후	219	222	201
Yen과 Chow	전	136	151	169
	중	135	152	169
	후	132	157	176
Keifer와 Chu	전	192	195	211
	중	211	214	199
	후	225	229	175
Huff	1	174	202	225
	2	115	134	153
	3	111	132	148
	4	183	207	229

3) 유역 홍수도달시간에 해당하는 성내유역 70분, 반포유역 120분, 동의대유역 40분의 강우지속기간에 대한 20년 빈도 5분 간격 우량주상도의 최대강우강도이다. 강우지속기간이 2시간 이내로 매우 짧고 우량주상도가 5분 간격이어서 Huff 분포도 시간당 강우량으로 환산한 강우강도(mm/hr)가 비교적 크게 나타나고 있다.

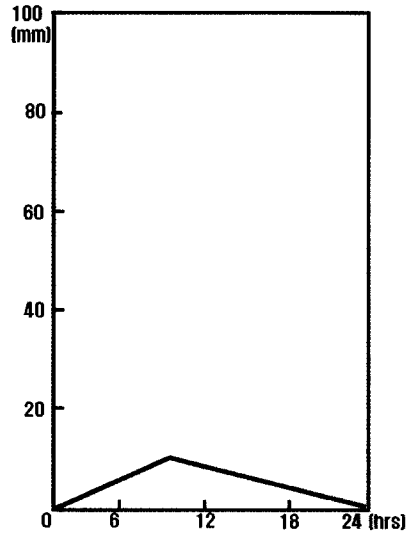
들어 1시간, 2시간, 3시간 등 지속기간별 누적최대강우량이 I-D-F 곡선으로부터 구한 값과 크게 다르다. 지속기간별 누적최대강우량이 정확하게 I-D-F 곡선과 일치하는 강우의 시간분포 모형은 교호블록형 외에는 없다. 배덕효 등(2004)은 교호블록 방법을 제외한 다른 강우분포모형에서는 분위선택이나 전, 중, 후 침투강우의 시간분포에 따라 최대강우강도가 달라지는 것을 발견하였다. 배덕효 등(2004)에 의하면 예

를 들어 동의대유역에 대한 Huff 분포의 경우 분위선택에 따라 최대강우강도가 148~229mm/hr까지 무려 55%나 변화하는 것으로 나타났다(표 3.1). 도시소유역에서 최대강우강도가 침투유량에 미치는 영향이 매우 큼을 감안할 때 분위선택에 따른 홍수량 변화가 클 것임을 알 수 있다. 따라서 객관적이고 일관성 있는 홍수량 산정을 기대하기 어렵다.

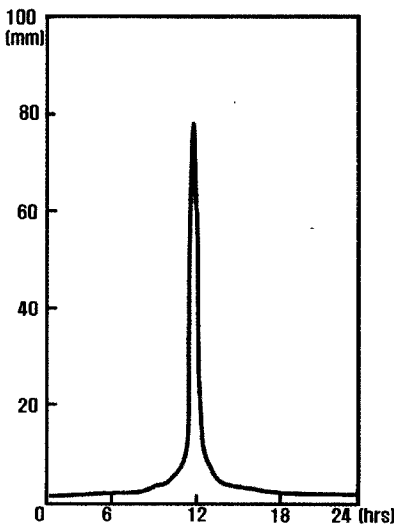
지속기간별 누적최대강우량이 I-D-F 곡선에서



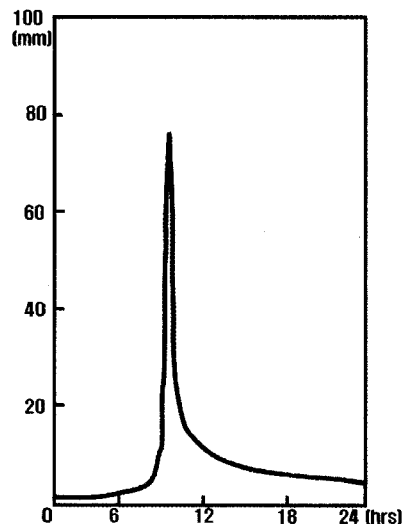
(a) Huff 분포



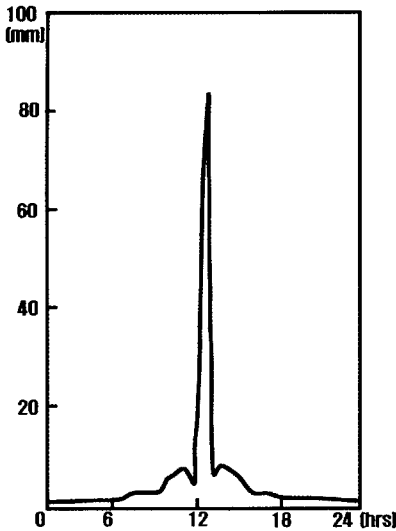
(b) Yen and Chow 분포



(c) SCS 분포



(d) Keifer and Chu 분포



(e) USACE 분포 (도면재작성)

그림 3.2 런던의 강우분포형에 따른 우량주상도 (Prodanovic 등, 2004)

구한 강우량과 크게 다를 경우 그 강우량은 정확한 확률빈도 강우량이라고 보기 어렵다. Huff 분포에서는 지속기간별 누적최대강우량이 분위별로도 달라진다. 전체 호우지속기간에 대한 총강우량이 같다고 할지라도 지속기간별 누적최대강우량 즉, 어느 시점의 강우강도가 달라지면 홍수량이 달라질 수 밖에 없다.

Huff 분포의 두 번째 문제점은 지속기간이 길어질수록 우량주상도가 평활해져간다는 점이다. 그림 3.2는 강우 분포형에 따른 런던의 우량주상도이다 (Prodanovic 등, 2004).

Huff 분포와 Yen and Chow 분포는 최대강우강도가 10~20mm/hr 정도에 불과한 반면, SCS 분포와 Keifer and Chu 분포, HEC-HMS 모형에 내장된 USACE 분포는 최대강우강도가 80mm/hr 정도로 Huff 분포나 Yen and Chow 분포 보다 4배 이상 큼을 알 수 있다. Prodanovic 등(2004)은 Huff 분포에 대하여 시간에 대한 평활화 과정(temporal

smoothing)에서 첨두강우량(peaks) 등 중요한 강우의 지역적 특성을 상실할 수 있으며, Huff 분포는 약한 강도의 강우가 상당 기간 지속되는 지역에 적합하다고 지적하고 있다. 우리나라에 홍수를 가져오는 특히, 홍수도달시간이 30분 이내인 소하천<sup>4)</sup>에 국지적이고 돌발적인 홍수를 발생시키는 집중호우의 특성과는 맞지 않는 분포라고 할 수 있다.

윤용남 등(2004)은 Huff 분포는 “4가지 분위기를 전 지속기간에 대하여 적용하였기 때문에 무차원 누가곡선이 평활하게 되어 단기간의 첨두강우량을 실제 확률강우량처럼 높게 표현할 수 없으므로 소규모 유역의 첨두홍수량을 매우 작게 산정하는 문제점”이 있다고 지적하였다. 이를 개선하기 위하여 임의로 특정 분위 분포(예를 들면 소하천시설기준에서는 2분위, 재해영향평가에서는 홍수량이 가장 크게 계산된다는 이유로 4분위)를 채택하기도 하지만 이 경우 당해 지점에서 가장 높은 빈도를 보이는 강우 분포형을 채택한다는 Huff 분포의 의의가 퇴색되는 문제점이 있다. 사실 강도가 높은 강우가 통계적으로 어느 분위에서 많이 발생하는지가 그렇게 중요한지 반문하고 싶다. 해당 지점의 분위가 그렇게 중요하다면 왜 소하천시설기준에서는 2분위로 고정시키고, 재해영향평가에서는 4분위로 고정시켜 놓았는가?

한편, Huff 분포를 채택하여 빗물펌프장을 설계 또는 평가하는 실무자들은 또 다른 형태의 고민에 빠져 있다. Huff 분포에 의해 임계지속기간을 고려한 홍수량을 산정하여 빗물펌프장의 능력을 평가한 결과 과거 2시간 내외이던 임계지속기간이 6시간 이상 길어지고 이에 따라 빗물펌프장으로 유입되는 홍수량 총량이 크게 증가하여 빗물펌프장의 펌프 용량을 과대할 정도로 늘리거나 우수지를 어마어마하게 늘려야 하는 데 그럴 여건이 안 된다는 것이다. Huff 분포는 최대강우강도는 약하지만 어느 정도 이상의 비슷한 강도의 강우가 상당한 기간 동안 지속적으로 내리는

4) 우리나라 소하천은 대체로 유역면적 10km<sup>2</sup> 이하, 유로연장 6km 이하로 대부분 급경사(하도경사 0.02 이상)이며 홍수도달시간은 30분 이내로 나타났다(이동률 등, 1991).



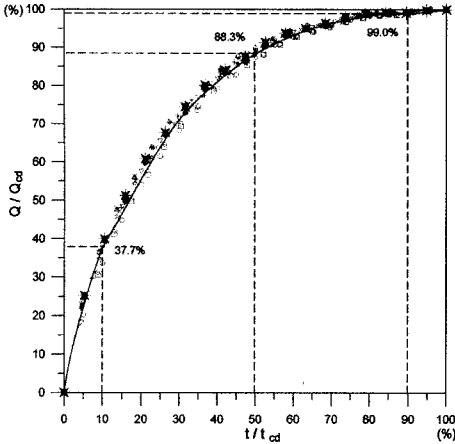


그림 3.3 임계지속기간과 침투홍수량 무차원곡선(박상우 등, 2005)

것으로 분포시키기 때문에 빗물펌프장 설계나 평가시에 과대한 부하를 발생시키고 있는 것으로 보이며 이 부분은 추후 정밀한 연구가 필요하다고 사료된다.

임계지속기간의 적용도 상당한 주의를 요구한다. 박상우 등(2005)에 의하면 섬강유역의 경우 임계지속기간의 1/2 시점에서 홍수량은 임계 침투홍수량의 88% 수준에 도달하게 된다(그림 3.3).

그 이후로는 강우지속기간이 늘어나는 것에 비하여 홍수량의 증가는 지수함수적으로 매우 완만하게 증가할 뿐이다. 빗물펌프장의 능력 초과 사례는 확률 강우량의 증가에도 부분적으로 기인하겠지만 우리나라 도시 소유역 강우 특성과는 맞지 않는 Huff 분포가 이러한 임계지속기간의 특성과 맞물리면서 발생시키는 부작용일 가능성이 높다고 생각된다.

이상과 같이 Huff 분포에 의해 홍수량 산정 지점별로 강우량을 적용하는 현재의 강우-유출 모의 방법은 유역 상하류를 일관하는 치수정책수립의 출발점이 될 상하류가 연계된 홍수량 산정에 장벽이 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안은 이동강우를 적용하는 것이다. 면적감소계수를 인위적으로 적용하지 않으면서도 유역 전체적으로는 면적감소계수를 적용한 효과가 자동적으로 발생하는 이동강우를 적용하지 않고는

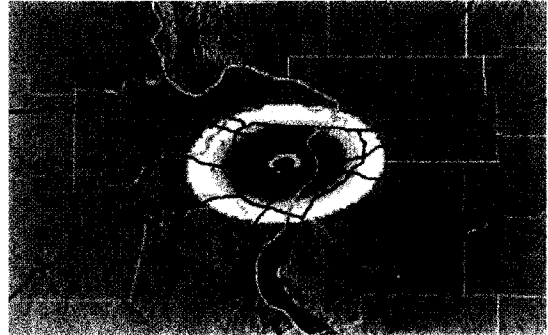


그림 3.4 이동설계강우(Hoblit 등, 2004)

이 문제의 해결이 사실상 불가능하다. 이동강우의 경우 호우의 중심에서 바깥쪽 방향으로 호우의 강도가 급격히 약해질 뿐만 아니라 유역을 통과할 때 방향성을 가지고 이동하기 때문에 같은 시간에도 강우가 강하게 내리는 지역과 내리지 않는 지역이 유역 강우의 시공간적 분포에 반영되어 면적감소계수를 별도로 적용할 필요가 없다. 그리고 상하류 지점의 홍수량은 단일 호우사상에 의한 것으로서 상하류간에 직접적인 연관성을 갖게 되며 이와 같은 강우-유출해석이 자연현상을 적절히 반영하고 있음은 당연하다.

Hoblit 등(2004)은 이러한 면적감소계수 적용의 어려움을 극복하고 호우의 시공간적인 분포 특성을 반영하여 설계강우를 결정하는 방법으로 그림 3.4와 같은 이동설계강우의 적용방안을 제시하였다.

Hoblit 등(2004)은 유역내의 각 지점별로 설계의 궁극적인 기준은 그림 3.5의 좌측에 제시된 I-D-F 곡선식에서 교호블록방법으로 구한 우량주상도를 얻어, 이동강우의 속도를 변화시켜 이와 비슷한 우량주상도를 얻을 수 있음을 보여주었다.

국내에서는 2007년 건교부에서「치수정책수립을 위한 강우-유출 모형의 적용성 분석 연구」를 통하여

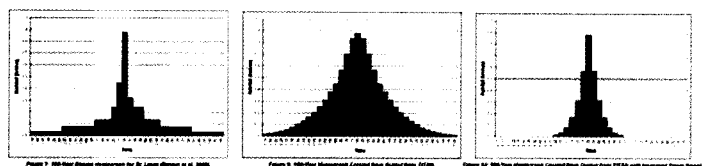
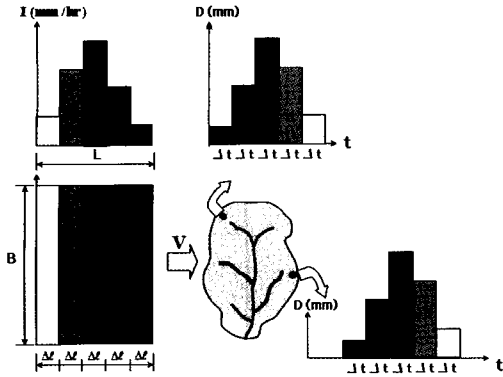
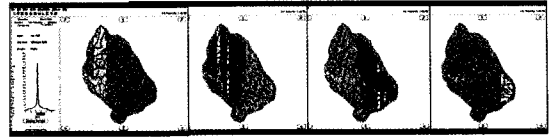


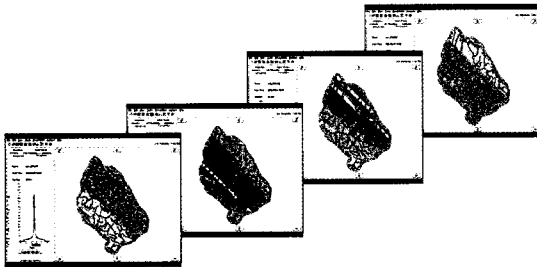
그림 3.5 교호블록형 설계강우(좌), 이동강우(10mph), 이동강우(30mph)



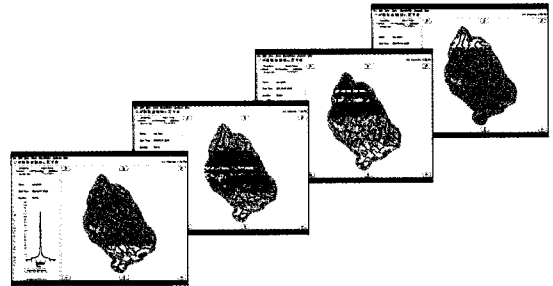
(a) 교호블록형 이동강우 모식도



(b) 교호블록형 이동강우 적용 사례(한강 대유역, 서→동)



(c) 교호블록형 이동강우 적용 사례(한강 대유역, 남서→북동)



(d) 교호블록형 이동강우 적용 사례(한강 대유역, 남→북)

그림 3.6 교호블록형 이동강우 모식도와 실제 적용 사례(건교부, 2007a)

교호블록형 이동강우를 채택한 설계홍수량 산정방안을 제시하였다(그림 3.6 참조). 이 보고서에는 이동강우의 이동방향(남에서 북, 남서에서 북동, 서에서 동)과 이동속도, 강우지속기간 등 설계강우를 표준화하는 방안을 제시하고 있다.

임진강을 포함한 한강수계에 대한 100년 빈도 48시간 지속 이동강우의 적용을 통하여 유역면적이 불과 2km<sup>2</sup> 정도에 불과한 소유역에서부터 중규모유역 뿐만 아니라 유역면적이 34,150km<sup>2</sup>에 이르는 한강하구 대유역까지 각 유역별로 임계지속기간과 이에 따른 임계 첨두홍수량이 자동 산정되었다. 이것은 교호블록형 강우분포가 임의 시간에 대한 임계 호우를 포함한 분포이기 때문에 가능한 것이다(McCuen, 1989). 이러한 이동설계강우의 적용을 통하여 임진강을 포함한 한강 하구(34,150km<sup>2</sup>)의 홍수량과 그 안에 포함된 중랑천(300km<sup>2</sup>), 중랑천 안에 포함된 우이천(27.5km<sup>2</sup>),

우이천 안에 포함된 가오천(지방2급, 유역면적 2.5 km<sup>2</sup>)의 홍수량을 수계 일관하여 동시에 구할 수 있었다. 그림 3.6(b)~(d)에서 같은 시간대의 강우띠(band)에서도 시강우량을 나타내는 색이 부분적으로 다른 것은 한강수계 내에 있는 57개 강우관측소의 확률강우량 비가 티센법에 의해 반영되었기 때문이다. 표 3.2는 팔당지점(23,590km<sup>2</sup>)에서 한강 인도교(24,780km<sup>2</sup>) 사이 한강본류구간의 홍수량 산정 사례를 비교한 것이다.

이승재 등(1995)은 팔당 직하류 고안에서 결측 기간을 제외하고 63년간 관측된 수위자료를 이용하였으며, 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 자연홍

표 3.2 한강본류 100년 빈도 홍수량 비교

산정 사례	홍수량(cms)	자료기간 / 방법	비 고
이승재 등(1995)	37,080~44,820	1917~1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>고안(68년부터 댐 영향 포함)</li> <li>최소치 Gamma-2</li> <li>최대치 LN-2</li> </ul>
윤용남 등(1998)	38,930~42,620	1968~1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>인도교(댐 영향 배제)</li> <li>최소치 EV1</li> <li>최대치 Pearson Type-3</li> </ul>
건교부(2007a)	40,780~43,190	교호블록형 이동강우와 분포형모형	<ul style="list-style-type: none"> <li>팔당(댐 영향 배제)</li> <li>최소 남→북 / 최대 남서→북동</li> <li>인도교는 41,160~43,290cms</li> </ul>
김남원 등(2009)	55,350	SWAT-K 일유량으로부터 첨두유량 추정	<ul style="list-style-type: none"> <li>팔당(댐 영향 배제)</li> <li>1986~2005 일강우자료 이용</li> <li>첨두유량/일유량 비 1.34 적용</li> <li>첨두유량 빈도해석 EV1 적용</li> </ul>

수량은 댐 건설 이후 크게 증가한 것으로 분석하였다. 건교부(2007a)에서 교호블록형 이동강우와 분포형모형을 적용하여 구한 100년 빈도 홍수량은 홍수위 실측자료를 빈도 해석하여 구한 이승재 등(1995), 윤용남 등(1998)의 홍수량과 사실상 일치하는 것으로 나타났다.

이동강우의 적용을 위해서는 물리적 인자 기반의 분포형모형(physics-based distributed model)의 적용이 필요한데 분포형모형은 운동파방정식(kinematic wave equation)에 의한 동수역학적인 유역추적 및 하도추적을 수행하며, 수치지도(DEM, 토지피복도, 토양도)에서 경사도, Manning의 조도계수, 투수계수 등 객관적이고 물리적인 매개변수를 추출하여 홍수량을 계산하기 때문에 홍수량 산정 절차와 매개변수를 표준화할 수 있는 큰 장점이 있다. 그림 3.7은 미국 텍사스주 Harris Gulley 도시 소유

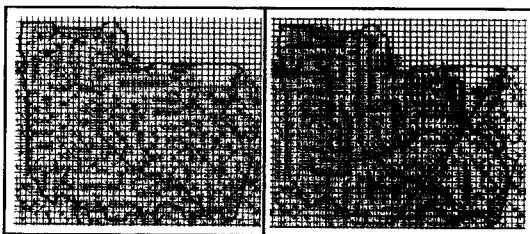


그림 3.7 도시 소유역에 대한 분포형 강우-유출모형 구축 예(Zheng Fang)

역(유역면적 14.2km<sup>2</sup>)에 적용한 분포형 강우-유출모형을 나타낸 것이다. 도시유역을 세밀한 격자망으로 세분하여 상세한 수문학적 정보를 입력할 수 있으며, 도시의 경우 우수관거나 도로 등 수리·수문학적인 자료를 정밀하게 입력할 수 있을 뿐만 아니라 토지이용의 변화(국지적인 개발 또는 복원, 소규모 저류시설치 등)에 따른 영향을 정밀하게 모의할 수 있다.

그림 3.7에서 좌측은 하천 외에는 모두 지표면 셀로 처리한 분포형 강우-유출모형이고 우측은 도로와 우수관거를 하도 셀로 처리한 경우이다. 그림 3.8은 이 지역의 설계강우인 100년 빈도 24시간 지속 확률강우에 대한 홍수량을 비교한 것이다. 분포형모형에서 도로와 우수관거를 하도 셀로 처리해 줌으로써 도

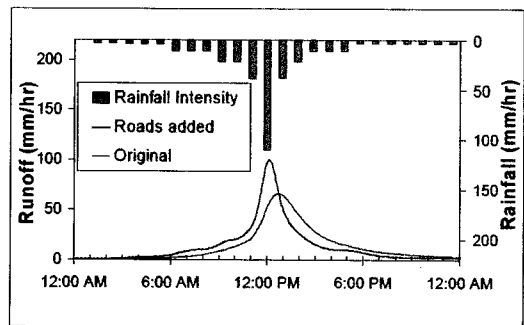


그림 3.8 도로와 우수관거 포함에 따른 설계홍수량 변화(Zheng Fang)

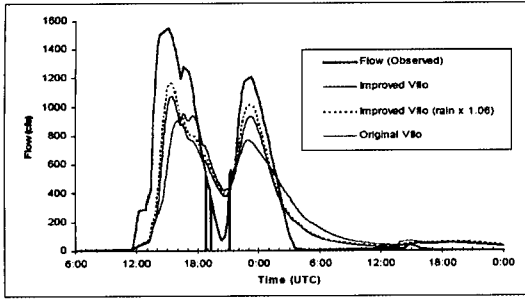


그림 3.9 도로와 우수관개 포함에 따른 홍수량 변화 (Zheng Fang)

시 소유역에서 발생하는 홍수가 집중호우에 더욱 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

그림 3.9는 2002년 이 지역에 발생한 홍수에 대한 모의 결과를 비교한 것인데 Zheng Fang은 도시 수문시스템에 크게 영향을 미치는 도로와 우수관개를 분포형 강우-유출모형에 포함시킴으로써 첨두홍수량의 크기와 발생시점을 더욱 정확하게 모의할 수 있는 것으로 분석하고 있다.

소하천을 포함하고 있는 소유역은 유역내에 강우관측소가 거의 없어서 홍수유출을 모의하는데 어려움이 많다. 레이더 강우를 이용하는 것은 이러한 소유역의 강우-유출 모의의 어려움을 극복하는 좋은 방법이 될 수 있다. 그림 3.10은 기상청 인터넷 홈페이지에서 레

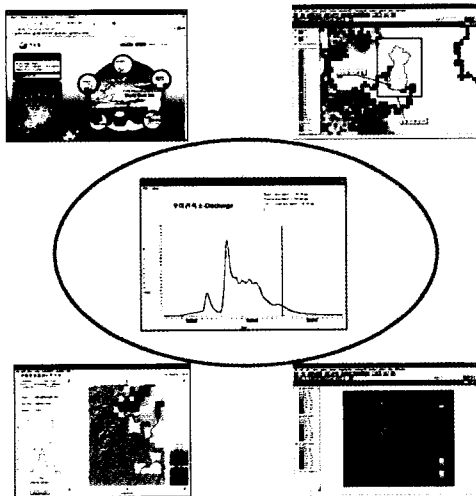


그림 3.10 RAIDOM 기법에 의한 레이더 강우-유출모의

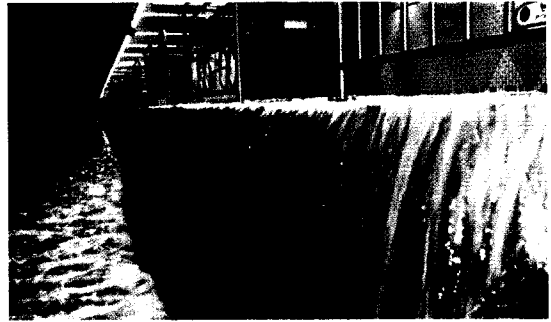


사진 3.1 폭포로 변한 3호선 정발산역(출처: 경향신문 2006.7.12)

이더 강우영상을 실시간으로 다운로드 받아서 ArcView에서 RAIDOM 기법으로 디지털화하여 분포형모형으로 강우-유출을 모의하는 절차이다(상세한 방법과 예제는 제20회 수공학 워크샵 자료 참조).

그림 3.11은 기상청 인터넷 홈페이지에서 실시간으로 다운로드 받은 레이더 강우영상을 RAIDOM 기법으로 처리하여 한강유역(유역면적 34,150km<sup>2</sup>)의 홍수량을 분포형모형으로 모의한 경우이다. 여기에 모의된 2006년 7월 12일 호우는 고양시 일대에 큰 피해를 입힌 바 있다(사진 3.1).

기상청에 의하면 이 호우는 오전 8시부터 11시 사이에 시간당 강수량이 70mm를 넘는 많은 비가 한꺼번에 내린 돌발성과 함께, 극심한 강수량의 지역편차를 보인 집중호우의 특징을 보였다. 고양시 주교동에서는 07시부터 10시까지 3시간동안 198mm(AWS

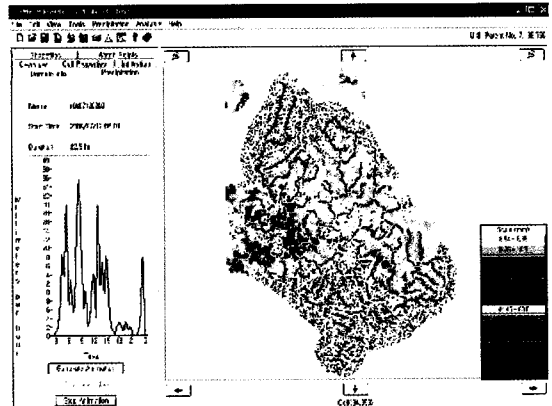


그림 3.11 한강유역 레이더 강우-유출 모의(2006년 7월 12일 호우사상)

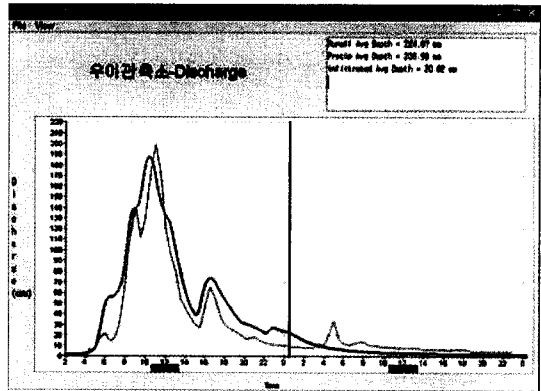
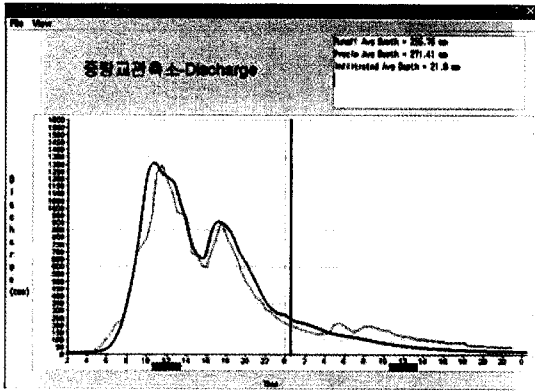


그림 3.12 레이더 강우-유출모의와 실측치 비교

관측)의 강수량을 기록하였다. 경기북부에는 300mm 이상인 반면, 경기남부는 50mm 내외에 불과했고 서울시 내에서도 도봉구가 294mm인 반면, 중구는 53mm에 불과하여 강수량의 극심한 편차를 보였다.

그림 3.12는 중랑천 유역의 우이관측소(24.25km<sup>2</sup>)와 중랑교관측소(207.75km<sup>2</sup>)의 홍수량 모의치(적색선)와 실측치(흑색선)를 비교하여 나타낸 것이다. 레이더 강우로부터 모의된 홍수 수문곡선이 실측 홍수 수문곡선과 첨두홍수량 뿐만 아니라 상승부와 하강부에 이르기까지 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

분포형모형의 이론과 실습 예제 및 각종 자료는 한국수자원학회 수공학 워크샵(2009.2.23~24)을 통하여 제공한 바 있으며, 상세한 국문 매뉴얼(총354쪽)은 한국수자원학회 홈페이지(www.kwra.or.kr)에 로그인하여 '자료실'에서 '수공학 워크샵'을 클릭하여 '제20회 수공학 Workshop 강의자료'에서 다운로드 받을 수 있다.

#### 4. 결론 및 발전 방향

본고를 통하여 실핏줄처럼 민감한 소하천과 그 소하천을 품고 있는 유역의 건전성을 회복하기 위한 유역관리 방안과 유역 최상류 동네 하천에서부터 대유

역 분류까지 수계 일관적인 치수계획을 수립하는 방안을 통하여 새롭게 유역을 바라보는 시각을 제시하고자 하였다. 본고에서 고찰한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 소하천을 품고 있는 소유역은 개발에 대한 수문 순환시스템의 민감도가 매우 크기 때문에 홍수량 총량관리 측면에서 유출계수지표의 도입, 원인자부담원칙에 의한 가칭 홍수부담금 부과, 인센티브제 도입 등 유역관리를 위한 특단의 조치들이 필요하다.
- 2) 현재 널리 사용되고 있는 HEC-1, HEC-HMS 등 단위도법 기반의 집중형 강우-유출모형은 소하천에 대한 홍수량을 제대로 계산할 수 없다. 소유역의 민감한 변화를 수문모의에 직접 반영할 수 있으며, 물리적인 매개변수 채택과 동수역학적인 홍수량 계산 방법으로 객관성과 일관성 및 신뢰성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 홍수량 산정방법의 표준화를 이룰 수 있는 물리적 인자 기반의 분포형 강우-유출모형을 도입해야 한다.
- 3) 현재 널리 사용되고 있는 Huff 강우분포모형은 우리나라에 침수피해를 유발하는 호우의 첨두 특성(burst)을 제대로 반영할 수 없으며, 면적 감소계수를 적용하는 정제강우모형으로는 소하천부터 대하천에 이르는 수계 일관 홍수량 산정

이 불가능하다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 교호블록형 이동강우를 도입해야 한다.

- 4) 거의 대부분이 미계측 상태인 우리나라 소하천의 실시간 홍수량을 구하는 방법으로 레이더 강우를 이용하는 방법을 적극 도입해야 한다.

본고를 마치면서 우리나라 수자원 실무 기술의 현황과 발전 방향에 대한 김승(2008)의 지적을 요약하여 정리해 보았다.

- 1) 우리나라 수자원 실무(하천기본계획, 유역종합치수계획, 댐계획 등)에 적용되는 기술은 20년 전과 비교하여 달라진 것이 거의 없는 낙후된 수준이다.
- 2) 그 원인은 연구와 실무 그리고 정책의 선순환 구조가 이루어지지 않고 있기 때문이다. 수자원 분야에서도 많은 연구 논문이 나오고 있지만 정책과 동떨어져 있거나 실무와 연계가 미흡하여 기술 발전을 달성하기 어려운 관행이 유지되고 있다.

그리고 그는 이를 개선하기 위해 즉각 시행해야 할 세 가지 방안을 제시하였다.

- 1) 설계홍수량 추정방법을 개선해야 한다. 이제는 더 이상 ‘확률강우량-단위도법’ 방법을 고집해서는 안 된다. 이 방법에는 다양한 불확실성(확률강우량, 유효우량, 면적감소계수, 강우의 시공간분포, 강우-유출관계 등)이 내재되어 있어 실무자에 따라 차이가 나는 것은 불가피할 뿐만 아니라 경우에 따라서는 그 차이가 너무 커서 소

송 사유가 되기도 하고 재판 과정에서 추정시마다 변경된 홍수량은 상대방의 조롱거리가 되기도 한다.

- 2) 하천시설의 영향 평가 방법을 정립해야 한다. 국제적인 평가 방법은 시설 유무에 따라 모의한 유출 결과를 비교하는 것이다. 그러나 우리나라에서는 치수계획에 이와 같은 확인 절차가 없다. 기 수립된 또는 수립중인 치수계획은 이와 같은 유출 모의 방식으로 설계가 확인되어야 한다.
- 3) 설계심의 방법을 개선해야 한다. 과업최종보고서가 아니라 과업지시서를 구체적으로 심의하여 최선의 방법과 기술을 선택하도록 요구해야 한다.

참으로 우리나라 수자원 실무 기술의 문제점과 나아갈 방향의 맥을 제대로 짚었다고 생각된다. 우리나라는 지금 4대강 살리기라는 국가 대형 수자원 프로젝트를 추진하고 있다. 이러한 중요한 시점에서 이와 같은 문제점들이 그대로 반복되어서는 결코 안 될 것이다. 후세에 두고두고 자랑할 수 있는 사업이 되도록 열린 마음과 새로운 기술로 계획하고 설계하며 관리해야 할 것이다. 그리고 대하천에 쏟아 있는 우리의 시야를 조금만 더 넓혀 소하천을 새로운 시각으로 바라보자. 복원율이 36%에도 못 미치는 소하천에서 50% 이상의 홍수재해가 발생하고 있다고 한다(김영오, 2009). 4대강의 뿌리요 실핏줄인 소하천을 더 이상 외면하지 말고 미래지향적인 치수계획 안으로 끌어들이어야 할 것이다. 정부와 지자체 산하연 그리고 그 누구보다도 그 소하천을 늘 바라보며 살아가는 우리 모두의 관심과 노력이 그 어느 때 보다도 절실하다. ☞

참고문헌

- 건설교통부. 유역종합치수계획수립지침작성 최종보고서. 2001.
- 건설교통부. 하천설계기준. 2005.
- 건설교통부. 치수정책수립을 위한 강우-유출 모형의 적용성 분석 연구. 2007a.
- 건설교통부. 홍수량할당제 도입에 관한 연구(최종보고서). 2007b.
- 건설교통부. 홍수량 산정기법 가이드라인. 2007c.
- 김남원, 이정은. “한강유역의 다목적댐 운영에 따른 빈도홍수량의 평가.” 한국수자원학회논문집, 제42권, 제2호, pp. 161~169, 2009.
- 김승. “수자원 실무 기술을 선진화 하자.” 한국수자원학회지(물과 미래). 권두언. 제41권, 제12호, pp. 4~9, 2008.12.
- 김영오. 과실연 맑은 하천 시민 포럼 관련 기사 “4대강 살리기보다 동네 하천 더 급하다”의 면담 기사. 2009.
- 박상우, 전병호, 이신재, 박양래, 김명수. “설계강우의 임계지속기간 산정을 위한 수문요소의 영향분석.” 한국수자원학회 '05 학술발표회 논문집, pp. 571~577, 2005.
- 배덕효, 이정식. 도시 강우특성조사 및 지상강우관측 수집체계 구축. 도시홍수재해관리기술연구사업단. 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-06, 2004.
- 山海堂. 調節池の計劃と設計.
- 오경두. 미래지향적인 유역종합치수계획 및 하천정비. 제2회 차세대홍수방어기술개발 세미나 자료, 차세대홍수방어기술개발연구단. pp. 75~141, 2009.3.17.
- 윤용남, 원석연. “한강 인도교 지점의 계획홍수량 산정을 위한 지점빈도해석.” 한국수자원학회논문집, 제31권, 제4호, pp. 59~65, 1998.
- 윤용남, 안재현, 이상렬. 도시하천 유역종합 치수계획 수립기술. 도시홍수재해관리기술연구사업단. 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-14, 2004.
- 이동률, 이주현, 최성욱, 정상만. “우리나라 소하천의 수문지형학적 특성 및 계획하폭 결정에 관한 연구.” 대한토목학회논문집, 제11권, 제3호, pp. 67~73, 1991.
- 이승재, 서규우, 허준행, 조원철. “한강 고안지점의 홍수위 환산과 홍수 빈도해석.” 한국수자원학회논문집, 제28권, 제5호, pp. 191~204, 1995.
- 행정자치부. 소하천시설기준. 1999.
- Hoblit, B. Zelinka, S. Castello, C., and Curtis, D. Spatial Analysis of Storms Using GIS. ESRI 2004 GIS User Conference Proceedings, <http://gis.esri.com/library/userconf/proc04/abstracts/a1891.html>, 2004.
- McCuen, R.H. Hydrologic analysis and design. Prentice Hall Inc., 1989.
- Prodanovic, P. and Simonovic, S.P. Generation of synthetic design storms for the Upper Thames River basin. CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions. Project Report V. November 2004.
- Vieux, B.E. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Zheng Fang. Enhancing a Distributed Hydrologic Model: Addition of Storm Water Pipe Analysis within a GIS Framework in an Urban Area. Report for 2005TX193B.