

유역종합치수계획의 수리·수문분석



전병호 >>

육군사관학교 토목공학과 교수
bhjun@kma.ac.kr



오경두 >>

육군사관학교 토목공학과 교수
okd0629@kma.ac.kr

으로 이러한 문제들이 연구 보완됨에 따라 홍수량산정과 관련된 내용도 계속 보완되어 나가야 할 것이다.

그러나 모든 문제가 완벽하게 정립될 때까지 기다릴 수만은 없는 일이며, 현재까지 가용한 기술과 실무적인 적용성 등을 검토하여 합리적인 방안을 도출해 나가야 할 것이다. 따라서 본 고에서는 유역종합치수계획수립을 위한 홍수량산정과정에서 문제가 되고 있는 내용을 중심으로 가용한 기술과 실무적인 적용성 등을 검토하여 합리적인 방안을 모색함으로써 앞으로 수행될 홍수량산정 관련 연구에 기초적인 자료와 폭넓은 의견수렴을 위한 촉매제의 역할을 제공하고자 한다.

1. 머리말

유역종합치수계획을 수립하는 과정에서 합리적이고 적정한 홍수량과 홍수위를 산정하는 것은 매우 중요한 일이다. 홍수위와 이에 관련된 침수범람모의 등 수리적인 부분에 관해서는 '치수계획수립을 위한 홍수범람해석'에서 심도 있게 다루었으므로 본 고에서는 합리적인 홍수량산정과 관련된 내용을 중심으로 살펴보기로 한다.

홍수량 산정과 관련해서 강우자료의 처리, 유역특성의 분석, 홍수유출모의와 관련하여 많은 혼란이 있어 왔으며, 아직까지도 정립되지 않은 문제들이 남아 있는 것이 사실이다. 특히, 임의지속시간 환산계수의 적용, ARF의 적용 등 아직까지 기준이 명확하게 정립되지 않은 문제들이 일부 남아있는 바 여기에는 국내 관측망의 미흡과 자료의 부족 등에 기인한 문제들도 있고, 논의 저류효과, 국내 실정에 적합한 유출곡선지수 채택 기준과 같이 아직까지 국내에서 충분한 연구가 이루어지지 않은 문제들도 포함되어 있다. 앞

2. 강우분석 및 홍수량 산정

유역종합치수계획 등의 치수관련 계획 수립시 수문분석을 통한 홍수량 산정의 주요 절차를 도시하면 그림 1과 같으며, 주요 절차별로 문제가 되고 있는 내용을 살펴보도록 하겠다.

2.1 유역종합치수계획의 규모에 따른 문제

유역종합치수계획은 대유역의 상·중·하류를 아우르는 거시적인 계획(macro scale planning)으로서 유역 전체를 통합하는 유기적인 치수대책을 수립하는 것을 목적으로 하며, 특히 과거의 선방어 중심에서 획기적인 면방어 중심의 유역대응방안을 중심으로 치수계획이 수립되어지는 반면에 하천정비기본계획은 개별 하천의 하도정비중심으로 치수계획이 수립되는 미시적(micro scale planning)이며 지점 중심의 계획이다.

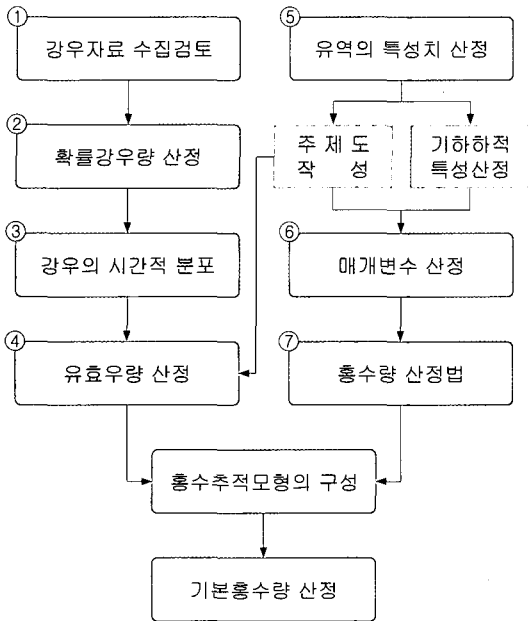


그림 1. 홍수량 산정절차

유역종합치수계획에서는 대규모 호우(synoptic-scale storms)의 특성을 반영하여 광범위한 대유역에 강우강도가 비교적 낮은 호우가 장시간에 걸쳐 발생하는 경우를 대상으로 홍수량을 산정하게 된다. 또한, 하천정비기본계획에서는 하도구간에 대한 치수계획을 수립하기 때문에 이 구간의 계획홍수량만을 산정하면 되나, 유역종합치수계획에서는 치수상 불리한 본류구간의 홍수방어를 위해 지류유역에 홍수량 배분계획을 수립하게 되는데, 이때 구간 지류의 홍수량은 본류 산정지점에서의 면적우량 환산계수 및 임계지속기간을 적용하여 구하기 때문에 지류의 자체 계획홍수량보다 적게 산정될 수 있다.

반면에 하천정비기본계획수립용역(지류)의 대상 유역은 대부분 수백 평방킬로미터 이내의 중소규모유역들로서 짧은 시간에 발생하는 집중호우(thunderstorms)에 의한 피해를 방어대상으로 하게 된다. 유역면적이 작기 때문에 ARF는 큰 값을 적용해야 하며, 호우는 지속기간이 짧고 최대 강우강도가 매우 큰 분포형을 채택하여야 하므로 유역종합치수계획에서 본류 중심으로 구한 홍수량을 그대로 지류 유역에 적용할 경우 과

소 설계할 가능성이 높다. 또한 하천정비기본계획에서는 산악효과 등 유역종합치수계획에서 거시적으로 반영하기 곤란한 지역적 특성을 최대한 반영하여 그 지역 특성에 적합한 홍수량을 산정하여 설계에 반영하는데 중점을 두어야 할 것이다.

즉, 과업규모에서 발생하는 차이에 따른 적용성의 문제가 있으므로 지류의 하천정비기본계획수립을 위한 홍수량과 유역종합치수계획의 홍수량은 별도로 산정하도록 하는 것이 바람직하다.

2.2 강우자료 수집검토

한강유역과 같은 대유역에는 180여 개의 우량관측소가 있는 반면에 중소유역 중에는 한 두개 우량관측소가 있거나 전혀 없는 유역도 있다. 이러한 유역에서는 유역 외에 위치한 인접한 우량관측소 등 가용한 우량관측소를 최대한 포함시켜서 분석하도록 하며, 관측기간이 다소 짧더라도 강우관측자료의 보완방법에 의하여 자료를 보완 확충하여 활용할 수 있도록 하여야 할 것이다. 또한 우량관측소가 전혀 없는 유역은 한국확률강우량도의 자료를 활용하여 분석할 수 있을 것이다.

이상치(outlier)는 계측상의 문제로 인한 것이 아닌 경우에는 실측 극한사상으로 포함시키도록 하며, 우량관측소가 부족한 유역에서는 10여년 이상의 자료를 가진 관측소에 대해서 자료의 신뢰성과 확충 방안을 검토하여 분석에 포함시키도록 하는 것이 바람직하다. 한편, 장래 강우의 변화추세를 분석하기 위한 방법은 자료의 제한 등으로 연구단계에 있고 아직 실무적으로 적용하기에는 어려움이 있으므로 객관적인 평가가 가능한 도시화 등으로 인한 유출변화 요인만을 반영하여 장래 홍수량을 산정하도록 하는 것이 타당할 것이다.

임의지속시간 환산계수 산정방법을 살펴보면 강우관측지점별로 고정시간과 임의시간에 대한 연최대치 강우량계열을 구축하고, 이를 빈도해석하여 각 계열별 확률강우량을 산정한 후, x축에 대해 고정시간의

확률강우량, y 축에 대해 임의시간의 확률강우량을 각 지점별로 도시한 후 선형회귀분석에 의해 선정된 계수를 임의시간의 환산계수로 제시하고 있다. 따라서, 임의시간 환산계수의 적용은 상기 계수의 유도과정을 준용하여 고정시간확률강우량을 산정한 후 환산계수를 곱하여 임의시간 확률강우량으로 변환하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

한편, 최근 임계지속기간을 적용해 보면 대하천의 경우 24시간 이상의 강우지속기간이 나타나는 경우가 있다. 회귀곡선에 의하면 24시간 이상일 경우 거의 변화가 없는 것으로 나타나므로 추후 48시간 이상에 대한 검토 자료가 가용할 때까지 24시간 변환계수값을 준용하는 것이 합리적이라 사료된다.

2.3 확률강우량 산정

확률강우량을 산정하기 위한 빈도해석의 주요 산정절차를 흐름도 형태로 도시하면 그림 2와 같으며,

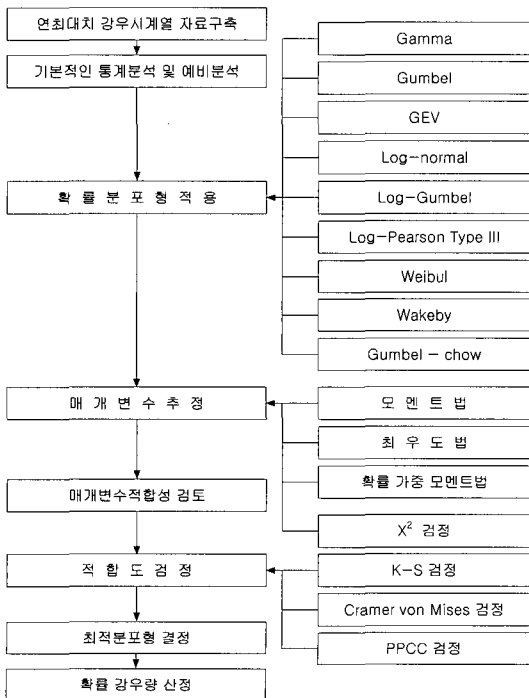


그림 2. 빈도해석 흐름도

주요 내용 및 확률강우량과 관련된 사항을 살펴보면 다음과 같다.

적합도 검정방법 중 Robustness 검정은 현재 확률분석에 널리 적용하고 있는 FARD에 구현되어 있지 않아 적용에 어려움이 있으나 앞으로 FARD 프로그램에 구현될 경우 분석에 포함시키도록 하는 것이 바람직하다고 사료된다.

최적확률분포형을 산정함에 있어서 적합도 검정이라 함은 통상 특정 확률분포형의 특정 자료계열에 대한 적합성 여부만을 판단하는 것으로 그 결과는 “적합” 또는 “부적합”으로 나타나게 된다. 따라서 오직 한가지 분포형만 적합으로 나타나지 않는 한 3가지 검정방법을 모두 동원해도 이를 토대로 최적분포형을 선택하기는 사실상 불가능하다. 현재 실무에서는 계산된 검정값이 가장 작은 경우를 최적으로 선택하고 있으나 이는 검정방법의 기본을 벗어나는 것으로 잘못 적용되고 있는 부분이다. 따라서 현실적으로 적합도 검정은 적합도 검정을 통해 기각해야할 분포형을 골라내고 나머지 적합한 분포형 중에 도시법에 의해 채택하고자 하는 빈도 부근의 적합성을 고려하여 선택해야 할 것이다.

유역면적이 수천 평방킬로미터가 넘는 대유역에 대한 일관성 있는 ARF 적용 기준의 부재로 실무에 혼란을 초래하고 있다. 홍수량산정지점별로 ARF를 적용하는 것은 해당지점의 집수면적에 해당하는 정확한 ARF를 적용할 수 있다는 장점이 있는 반면에 다른 지점의 홍수량과 무관한 독립적인 홍수량이 산정되어 다른 지점들과 상호 연관성을 부여하기 곤란한 어려움이 있으며 이는 결국 상하류를 연관하는 유역 대응방안수립에 어려움을 초래하고 있다. 한편, 전체 대유역에 하나의 ARF를 적용할 경우 상류에 위치한 지점과 하구부에 위치한 지점의 홍수량에 너무 큰 상대적 불균형이 발생하여 일관성 있는 계획수립에 어려움이 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로서 권역별 ARF(Zonal ARF)를 적용하는 방안을 고려해 볼 만하다고 사료된다. 권역은 유역면적이 아니라 ARF

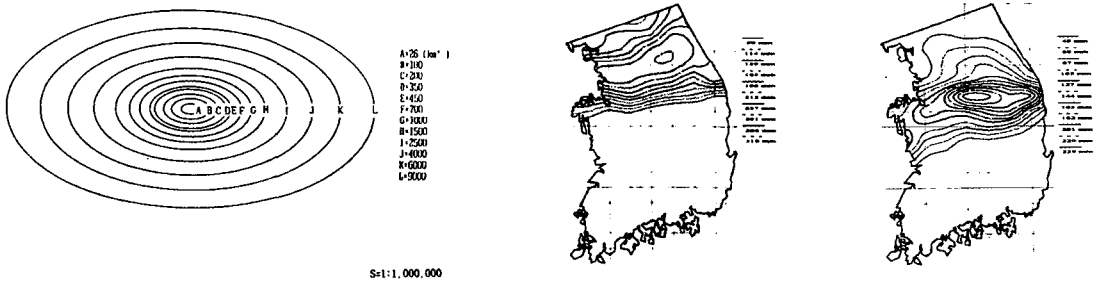


그림 3. 가상적인 호우 공간형상(좌측)과 태풍(중앙) 및 저기압(우측)에 의한 호우 공간형상

(위의 호우자료 출처: '한국의 주요 호우(건교부, 2000)')

를 기준으로 분할하는 방안이 적절할 것으로 사료된다. 이 경우 어떤 특정권역(예: ARF 0.82~0.77)에 포함된 홍수량산정지점의 최대 ARF 적용상의 오차는 ARF 적용 구간의 크기(예: 0.05, 최대 5%) 이내로 통제가 가능하게 될 것이다. 예를 들어 100년 빈도 24시간의 경우 한강과 임진강을 합친 하구점의 면적은 약 34,400km² 정도이며, 이에 대한 ARF는 0.73 정도이다. 따라서 5개의 권역으로 분할할 경우 ARF 적용상의 최대 오차는 $0.27/5=0.054$ (약 5%) 정도의 오차수준을 유지할 수 있을 것이다.

권역별로 ARF를 적용한 경우 하류부 권역에 포함된 홍수량산정지점들의 홍수량 산정시에 상류에 위치한 권역들에 포함된 홍수량산정지점들은 원래 자기 자신의 집수면적에 해당하는 ARF를 적용한 홍수량이 아니지만 하류부 권역에 포함된 지점의 홍수량을 구하기 위한 유역 및 하도추적과정의 홍수량으로 이해할 수 있을 것이며, 따라서 하류 권역의 홍수량들은 상류권역의 소유역이나 홍수량산정지점들과 상호연관성을 유지할 수 있게 될 것이다. 그리고 이와 같은 권역별 ARF 적용시 권역별 구획화에 따른 오차는 포함하고 있으나 일정 수준의 오차범위 내에서 상하류간 일관성 있는 ARF의 적용이 가능하므로 대유역에 하나의 ARF를 적용할 경우와 달리 유역 상류지점에서 하류지점까지 적정한 ARF가 적용된 홍수량의 산정이 가능하게 될 것이다. 추후 이에 대한 심도 있는 연구 검토가 필요할 것으로 사료된다.

하천설계기준(건교부, 2002)에 의하면 대유역의

설계강우는 전이된 실제강우 또는 타원형을 갖는 설계강우가 유역에 공간적으로 분포된 상태를 고려하여 면적 확률강우량을 산정하도록 하고 있다. 그리고 국내에서 관측된 주요 호우들은 단축 대 장축의 비율이 1:2~1:3 정도인 타원형 분포를 나타내는 것으로 알려져 있다.

그림 3의 좌측 그림은 대유역에서 발생하는 전형적인 대규모 호우의 공간분포를 나타낸 것이다(건설부, 1988). 그림 3의 중앙에 위치한 그림은 1990년 9월 9일부터 신평을 중심으로 650mm를 넘는 24시간 지점 강우량과 20,000km²에 걸친 24시간 평균강우량 317mm를 발생시켰던 R199090904 호우의 24시간지속최대에 대한 등우선 분포를 나타낸 것으로서 원인은 태풍이었다. 그리고 우측의 그림은 1994년 6월 29일부터 덕산을 중심으로 300mm가 넘는 24시간 지점 강우량과 20,000km²에 걸친 24시간 평균강우량 150mm를 발생시켰던 R1994062904호우의 24시간지속최대에 대한 등우선도로서 호우의 원인은 저기압 기단이었다.

그림에서 알 수 있듯이 대유역에서 실제 발생하였던 주요 호우사상들이 공간적으로 광범위한 넓은 지역에 걸쳐 타원형에 가까운 형태로 분포하고 있음을 알 수 있다(보다 자세한 내용은 '한국의 주요 호우(건교부, 2000)' 참조).

「한국의 주요 호우(건교부, 2000)」에 주요 호우사상별로 DAD 분석한 결과를 살펴보면 유역면적의 증가에 따른 지속기간별 유역평균강우량의 감소율이 비

교적 큰 것으로 보인다. 이것은 우리나라 호우의 공간적 분포 특성을 나타내는 것으로 ARF 곡선에 잘 반영되어 있는 것으로 사료된다. 그러나 아직까지 우량관측망의 미흡과 자료의 부족 등으로 강우지속기간 24시간을 넘는 경우에 대해서는 ARF가 작성되어 있지 않다. 앞으로 이들 자료가 가용할 때까지 현재 가용한 자료를 준용하여 강우지속기간 24시간의 ARF를 적용하도록 하는 것이 타당할 것으로 사료되며 앞으로 수문자료의 확충에 따라 이 부분에 대한 집중적인 연구와 보완이 필요할 것으로 사료된다.

「한국 확률강우량도 작성(건교부, 2000)」 123쪽, 「7.2 면적우량 환산계수의 산정」에 의하면 “국내 우량관측소 중 비교적 관측밀도가 높고 특정호우 사상에 대한 동시강우자료를 획득하여 면적우량 환산계수를 결정할 수 있다고 판단되는 대표지역은 한강 유역으로서...평균관측밀도는 약 500km²당 1개소가 운영되고 있는 실정이다. 이 정도의 관측밀도는 미국 기상청이나 영국 Institute of Hydrology(1999)의 연구에서 이용한 관측밀도, 거의 10mi²(25.9km²)당 1개 관측소에는 상당히 미달하며 면적우량환산계수의 유도에는 비교적 정확도가 떨어진다고 보면, 강우의 공간분포 특성 연구에는 아직은 미흡한 상태이다.”라고 규정하고 있는 상황이므로 각 유역별로 ARF를 산정하여 적용하려는 것은 무리라고 사료된다.

2.4 강우의 시간적 분포

지속기간별 확률강우량은 해당 지속기간의 총량만을 나타내므로 홍수량 산정시 강우의 시간적 분포, 즉 유출에 기여하는 실제 우량상도를 결정하여 첨두홍수량이나 유출수문곡선을 산정하여야 한다. 대유역에서는 시간의 경과에 따른 호우 중심의 위치와 호우의 이동방향이 홍수유출에 미치는 영향이 매우 크므로 과거 주요 호우사상을 분석하여 이에 대한 영향을 도출하고 실제홍수량을 산정하는데 반영하는 것이 바람직하나 국내 여건상 이를 객관적으로 정량화시킬 만한 자료가 축적되어 있지 않으므로 유역내에서 발

생하는 호우사상의 시간적 변이성을 제한적이지만 관측소별로 발생빈도가 가장 높은 Huff 분포에 의하여 반영하도록 하는 것이 합리적이라 사료된다.

유역내에 위치하고 있는 각 우량관측소별로 해당 관측소지점에 가장 발생빈도가 높은 Huff 분포를 적용하여 강우의 지역적 특성을 반영하도록 하여야 한다. 홍수량산정에 필요한 강우의 시간적 분포형은 유역내에 위치하고 있는 각각의 우량관측소에서 전형적으로 나타나는 분포형이어야 하므로 우량관측소들의 강우 시간분포 유형을 평균한 것을 적용해서는 안된다. 이것은 평균하는 과정에서 우량관측소별 지역적 특성이 평활화(smoothing)되어 소멸되기 때문이다. 따라서 각 우량관측소별 Huff 분포를 평균하여 유역대표 Huff 분포형을 구하여 전 유역에 적용하는 것은 지역적 특성이 소멸되므로 이러한 방법을 적용해서는 안된다.

2.5 유효우량산정

유출곡선지수방법은 토양과 토지피복상태라는 유역의 물리적 특성을 반영한 경험적인 공식으로부터 유효우량을 산정하는 방법이다. 유역의 물리적 특성을 반영하고 있으므로 미세측유역에 대한 적용성이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 토양과 토지피복에 대한 미국 SCS의 분류 기준과 우리나라의 기준이 다를 수 있어 적용에 주의가 요구된다. 특히 미국의 분류 기준에는 논이 포함되어 있지 않으나 우리나라에는 논이 차지하는 유역 수문학적 비중이 높아서 이에 대한 적용 기준이 필요하다. 또한 현재 우리나라의 산림은 입산과 벌목의 통제 등으로 대부분의 산림이 키가 큰 교목과 낮게 자라는 관목, 잡초 등이 무성하게 섞여 자라고 있고, 낙엽이 매우 두껍게 덮여 있어서 미국 기준으로 볼 때 수풀(brush)의 배수량호(good)에 해당하여 수문학적 토양군 A, B, C, D별로 30, 48, 65, 73 내지는 삼림(woods)의 배수량호(good)인 30, 55, 70, 77에 가까운 것으로 보인다.

선행토양함수조건(AMC)을 분석하여 CN을 강우-

유출모의에 적용하는 것은 실측 강우유출분석에 적합한 방법으로서 기왕홍수의 재현이나 모형의 보정시에 필요하다. 또한 계획홍수량에 근접하거나 이를 초과하는 홍수사상에 대한 충분한 자료가 있을 경우 이의 분석을 통하여 해당 유역의 AMC 조건 및 유출곡선지수의 특성을 규명하여 적용하는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 경우를 제외한 미계측 유역에 대한 AMC 조건의 적용은 제주도와 같은 특수한 지역적 특성이 있는 경우(제주도는 “숨골” 등 배수특성이 특수하여 AMC-II를 적용)를 제외하고는 치수안정성을 고려한 정책적 판단기준에 의하여 결정되는 측면이 오히려 강하다고 볼 수 있다. 재해예방이라는 측면이 강조된 재해영향평가에서 AMC-III로 설계하는 것도 이와 같은 치수안정성 측면을 고려한 것이라고 할 수 있다.

논의 경우 총유출의 개념에서 불투수지역과 유사한 특성을 나타내나 또한 물고 높이와 담수심 사이의 공간을 이용하여 저류지와 유사한 기능을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 따라서 논의 경우 두 가지 방법으로 CN을 적용하는 것이 가능할 것으로 사료된다. 첫 번째 방법은 논의 토양은 사실상 불투수층으로 간주할 수 있으므로 토양의 구분 없이 AMC 조건에 따라 AMC-I에서는 63, AMC-II에서는 78, AMC-III에서는 88을 적용하는 것이다.

두 번째 방법은 논을 불투수 저류지로 간주하여 논의 최대잠재저류량(S)을 초기저류공간으로 갖는 저류지로 가정하는 것이다. 이 경우 임상준과 박승우(1997)의 연구에 의하면 AMC-I, II, III에 해당하는 논의 최대잠재저류량은 각각 146.6, 70.1, 33.6mm였다. 따라서 유역에 포함된 논의 면적과 저류공간을 고려하여 유역의 초기강우손실량을 조정할 수 있다. 예를 들어 유역면적이 100km²인 유역에 논이 30km² 포함되어 있다면 논으로 인한 유역평균초기강우손실량의 증가는 AMC III 조건에 대하여 33.6mm × 30km²/100km²=10.1mm가 될 것이다. 그대신 이 경우에 논은 하천과 같이 유출곡선지수값을 100으로 지정하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

두 가지 방법 모두 동일한 실측자료를 기반으로 추

정한 결과이나 첫 번째 방법은 논도 일반 농경지와 같이 침투에 의하여 대부분의 손실이 발생한다는 가정에 근거하고 있으며, 두 번째 방법은 침투에 의한 손실을 무시하고 오로지 저류효과만을 고려한 방법이다. 앞의 방법에 의한 AMC-III에서 총강우량 100, 200, 300mm에 대한 총손실량은 각각 31.4, 35.3, 36.8mm 정도로 최대잠재저류량을 저류공간으로 간주한 33.6mm와 총손실량은 비슷하게 나타났다. 그러나 논을 일반 다른 농경지와 같은 개념으로 본 경우에는 강우지속기간 동안 전기간에 걸쳐 지수함수적인 침투에 의하여 손실이 발생하는 것으로 가정하는 것이지만 논을 저류지로 간주하는 후자의 경우는 초기 강우를 저류하여 저류공간이 소진되고 난 이후에는 사실상 하천과 같은 역할을 하는 것으로 가정하는 것이다. 앞으로 논의 저류효과에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

「불투수면적을 고려한 도시유역 CN 산정 연구(오경두, 2004)」에 의하면 서울시 사례연구를 통하여 도시화지역의 불투수율이 미국과 달리 매우 높은 것으로 나타났고, 이에 따라 우리나라 도시유역의 CN 값은 미국 보다 큰 것으로 밝혀졌으며 특히, 주택지역의 불투수율이 가장 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 앞으로 도시유역의 유출곡선지수에 대한 추가적인 연구와 적용기준의 확립이 필요할 것으로 사료된다.

2.6 매개변수 산정

1) 도달시간

국내에서 개발된 대부분의 도달시간 산정 공식들이 유역면적, 유로연장, 유로경사 등과의 회귀식으로부터 산정된 경험식으로서 광범위한 대유역에 대한 적용성이 있는지 추가적인 분석 평가가 필요하다고 사료된다. 도달시간 산정을 위한 경험식들은 유용한 결과를 얻을 수 있지만 각 산정방법별로 편차가 클 뿐 아니라, 급경사하천이나 극히 완만한 경사의 하천인 경우 도달시간이 과대 혹은 과소하게 산정되는 경우가 있으므로, 이러한 경우에는 각 측정별 유속에

의해 구한 홍수 도달시간이 적용성이 클 수 있다.

일반적으로 소유역 하류단에 위치하는 농업용 저수지와 같은 중소규모의 저수지 구간은 홍수파의 유하시간이 매우 짧아서 별도로 도달시간을 산정할 필요가 없다. 그러나 충주호와 같이 저수지 구간이 78km 정도에 달하고 수면적이 매우 불규칙한 형태일 경우 도달시간 적용에 어려움이 있을 수 있다.

충주호에서 대략 100년빈도에 해당하는 첨두홍수량 14,000cms의 홍수파가 유하하는데 소요되는 시간을 Modified Pulse 방법에 의하여 저수지 홍수추적한 결과 저수지 지체시간은 약 14시간(평균유하속도 약 1.5m/s)으로 나타났으며,UNET으로 부정류 해석한 홍수파 유하시간은 약 8시간(평균유하속도 약 2.7m/s)으로 나타났다. 그리고 부정류 해석한 첨두홍수량의 감쇠효과는 1,700m³/s로 저수지 홍수추적의 감쇠효과 5,100m³/s의 1/3 정도인 것으로 나타났다.

1990년 충주댐 홍수모의 등을 통하여 판단해 볼 때 불규칙한 저류공간을 형성하는 저수지에 대해서는 저수지 홍수추적이 신뢰성이 높은 것으로 보이며(이 경우 저수지 구간에 대해서는 따로 도달시간의 적용이 필요 없음), 이는 부정류모형이 이론적으로 우수하나 불규칙한 하도단면과 저류공간의 영향을 적절히 반영하기 어려운 때문으로 사료된다.

2) 지체시간

지체시간(lag time)은 유효우량의 중심(center of mass)에서 첨두홍수량 발생까지의 시간을 의미한다. 지체시간은 Snyder 단위도의 2가지 매개변수 중 하나이며, SCS 단위도의 유일한 매개변수이다. $T_L = 0.6T_c$ 관계식은 자연유역에서 발생한 여러 강우유출사상을 분석하여 지체시간과 도달시간의 평균적인 관계를 도출한 식으로서 도달시간이 산정된 경우 지체시간을 평가하는 유용한 관계식으로 알려져 있다.

참고로 지체시간과 더불어 Snyder 단위도법의 또 다른 매개변수인 peaking coefficient C_p 를 추정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 지체시간을 이용하여 구

하는 미공병단 Tulsa District C_p 공식과 유역면적과 유역불투수율을 이용하여 구하는 Denver C_p 공식 두 가지를 소개하기로 한다(Dodson & Associates, Inc., 1995). 다음은 미공병단 Tulsa District C_p 공식이다.

$q_P = 380T_L - 0.92$ 이고 $C_P = q_P \times T_L/640$ 이며 여기서, T_L 은 지체시간(hr)이다.

다음은 Denver C_p 공식으로서 $C_P = P \times C_t \times (A/2.59)^{0.15}$ 이고 A는 유역 면적으로서 단위는 km²이며, 2.59는 평방마일과 평방킬로미터간 단위환산계수이다. P와 C_t 는 아래의 식으로부터 구하며 아래의 식에서 I_a 는 유역의 불투수율(%)이다.

$$P = 0.00245I_a^2 - 0.012I_a + 2.16 \quad (0 \leq I_a < 40)$$

$$P = -0.00091I_a^2 + 0.228I_a - 2.06 \quad (40 \leq I_a \leq 100)$$

$$C_t = -0.00371I_a + 0.163 \quad (0 \leq I_a < 10)$$

$$C_t = 0.000023I_a^2 - 0.00224I_a + 0.146 \quad (10 \leq I_a < 40)$$

$$C_t = 0.000033I_a^2 - 0.000801I_a + 0.120 \quad (40 \leq I_a \leq 100)$$

3) 유역저류상수

미계측 유역의 저류상수는 유역특성과 연관시키기 어려워서 도달시간 보다 더욱 산정이 어려운 인자로서 Clark 공식, Linsley 공식, Russel 공식, Sabol 공식과 같은 경험공식과 도달시간과의 회귀식 등을 이용하여 산정하게 된다. Clark 단위도법의 유역저류상수는 도달시간과 연관되어 있으므로 다음과 같은 회귀식으로 유역저류상수의 대략적인 범위를 판단할 수 있다(Peters, 1993).

$$\frac{R}{(T_c + R)} = M$$

여기서, R은 유역저류상수이고 T_c 는 도달시간이며, M은 유역의 경사에 따라 결정되는 계수로서 가파르고 저류능력이 크지 않은 상류 자연유역은 0.4 이내, 저류능력이 보통인 유역은 0.5 내외, 완만하고 저류능력이

큰 유역은 0.6 이상으로 대략적으로 추정할 수 있다.

Clark 합성단위도법의 2가지 매개변수 중의 하나인 유역저류상수(R)는 침투홍수량과 전반적인 수문곡선의 형태에 직접적으로 크게 영향을 미치는 중요한 매개변수로서 소유역별로 유역저류상수가 대략적으로 어느 정도의 범위에 포함되며 유역 상하류간에 전반적으로 일관성이 있는지를 확인한 후에 매개변수 보정을 수행하는 것이 중요하다.

2.7 홍수량 산정법

유역종합치수계획은 대유역의 상·중·하류를 아우르는 거시적인 계획으로서 유역전체의 유기적인 치수 대책을 수립하는 것을 목적으로 하며, 특히 유역대응 방안을 중심으로 치수계획이 수립되어진다. 이와 같은 관점에서 홍수량산정지점도 일정규모 이상의 하천에 대하여 산정하는 것이 바람직하다. 그러나 특별권역의 경우와 같이 상세한 홍수량산정이 필요한 경우에는 전체 대유역과는 별도로 홍수량을 산정하여야 할 것이다. 이들 특별권역과 같이 상세 홍수량이 필요한 대부분의 유역은 중소규모유역에 해당되므로 강우의 시간분포를 유역 특성에 적합하게 선정하도록 하며, 전체 대유역이 아닌 해당 유역면적을 기준으로 ARF를 적용하도록 하는 것이 타당할 것이다.

유역의 분할은 단위도법의 적용을 위한 기본적 가정한 유역 반응의 선형성을 확보하고 유역의 동질성과 강우의 균일성 등을 확보할 수 있도록 함과 동시에 수문곡선 상승부를 적절히 모의하기 위해서는 최소 계산시간 간격이 수문곡선 상승부의 1/4 이하여야 한다는 조건과 필요한 홍수량산정지점을 만족시킬 수 있도록 분할하는 것이 바람직하다. 이러한 조건을 감안하고 유역종합치수계획의 자료가 시간우를 기본으로 하고 있어 적절한 계산시간 간격이 대략 15분에서 1시간 정도인 점을 감안할 때 유역면적이 지나치게 과소하게 분할되는 것은 바람직하지 않다. Hydrology of Floods in Canada: A Guide to Planning and Design(NRCC, 1989) 에 의하면 유역과 하도를 필요

이상으로 세분할 경우에 강우유출모의 결과가 반드시 개선되는 것은 아니며 오히려 그 반대 현상이 발생할 수도 있음을 지적하고 있다.

천변저류지 등 저류시설을 diversion 기능 등을 이용해 모의할 수 있으나 여기에는 한계가 있다. 천변저류지의 경우 통상의 월류량은 횡월류웨어를 통해 이루어지나 HEC-1 이나 HEC-HMS 등에서 이를 정확히 모의하지 못하므로 적용에 주의해야 한다. 이들의 조절 효과를 적절히 반영하기 위해서는 별도의 작업을 통해 월류수문곡선을 구하고 이를 반영하여 모의하는 과정이 필요하다. 그리고 소유역내에 여러 개의 천변저류지나 홍수조절지가 있을 경우에 수리·수문학적 특성을 고려하여 이들을 하나 또는 둘 이상의 천변저류지군 또는 홍수조절지군으로 통합하여 평균적인 거동을 반영하는 것이 홍수량산정 측면에서 보다 합리적일 수 있으므로 이를 신중히 검토하여 결정하여야 할 것이다. 수문학적 모형이 갖는 이러한 단순화와 한계에도 불구하고 유역 전반적인 홍수저감효과와 홍수량을 판단하는데는 문제가 없다고 사료된다. 그러나 치수대책의 수리적 비교 평가에서는 별도로 UNET과 같은 부정류모형을 이용하여 대안별로 각 홍수조절시설의 상대적인 효과를 정밀 검토하는 것이 필요할 것이다.

김남원과 원유승(2004)은 유량환산이 가능한 지점인 한강 17개 지점, 낙동강 18개 지점, 금강 8개 지점, 섬진-영산강 13개 지점 등 모두 56개 지점에 대하여 일제시대부터 1999년까지 광범위한 홍수량 자료를 이용하여 지역빈도 분석을 수행한 결과로부터 빈도홍수량 회귀식을 도출하였는 바 강우-유출 모의 결과의 타당성을 비교 검토할 수 있는 좋은 자료라고 사료된다(보다 자세한 내용은 한국수자원학회 논문집 Vol. 37, No. 12, 2004. 12, pp.1019~1032 참조).

위의 홍수량 빈도분석에 사용된 자료들은 댐 건설 전부터 댐 건설 후까지 전체 자료를 이용하였으므로 댐의 영향이 포함되어 있으나 동 논문에서 댐의 역할에 대한 정확한 규명은 이루어지지 않은 상태이다. 최근 들어 전반적인 강우량의 증가와 대규모 홍수사상의 발생 빈도가 증가하고 있음을 감안할 때 댐의

홍수조절효과와 홍수량의 증가가 서로 상쇄되고 있는 것으로 추정된다. 실제로 동 논문의 댐 개발 전과 댐 개발 후를 포함한 전체기간 평균홍수량 비교 자료를 살펴보면 댐이 가장 잘 건설된 한강 유역의 경우 댐의 영향을 받지 않는 유역 상류부는 댐 개발 전 보다 평균홍수량이 증가한 반면 댐의 조절효과에 영향을 받는 한강 유역 중하류부는 댐 개발 전 보다 평균홍수량이 오히려 감소한 것으로 나타났다.

김남원과 원유승(2004)의 빈도 홍수량 경험식은 추후 기상변화와 댐의 영향을 규명하여 기상변화를 반영하고 댐 영향을 배제한 경험식을 제시할 경우 “기본홍수량”을 점검하는 중요한 지표자료로 활용 가능할 것으로 사료된다. 그러나 현재의 빈도 홍수량 경험식은 댐의 영향이 포함되어 있음에 주의하여 적용하여야 할 것이다.

2.8 하도추적

하도 추적 방법은 하도 구간의 수리적 특성에 따라 동일한 유역에 대해서 한 가지 이상의 방법을 복합적으로 적용할 수 있다. 하도 단면, 에너지 경사, 조도 계수 등 하도 제원의 산정이 용이한 개수된 하도구간은 Muskingum-Cunge 방법이 일반적으로 적합하며, 자연하도유역에는 Muskingum 방법을 적용하는 것이 일반적으로 적합하다. 단, 댐이나 하구언 등으로 인한 배수위의 영향을 직접적으로 받는 구간은 Modified Pulse 방법에 의한 하도 추적 또는 저수지 추적을 수행하여야 한다.

Muskingum-Cunge 방법은 확산과 정도의 매우 높은 정확도를 갖는 방법으로서 배수위의 영향을 받지 않는 대부분의 경우에 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. 한편, Muskingum 방법은 운동파와 확산파 모형 사이의 정확도를 가지고 있으며 넓은 홍수터를 포함하고 있는 하도 구간 등 자연하천유역에 적합한 것으로 알려져 있다.

Muskingum 방법의 하도저류상수 K 에 대한 가중치 x 는 저수지와 같이 유출량이 저류량에 미치는 영향

을 무시할 수 있어 최대 저류효과가 나타날 경우 0.0이고, 침투홍수량 발생시간의 지체만 나타나고 하도저류 효과에 의한 감쇄가 거의 발생하지 않는 인공수로와 같은 경우는 0.5에 가까운 값을 갖게 된다. 가중치 x 는 침투홍수량에 대한 민감도가 크지 않은 매개변수로서 통상 0.2 정도의 값을 적용하며, 유출자료가 충분할 경우 저류효과를 보정하여 적용하는 것이 타당할 것이다.

NRCC(1989)에 의하면 넓은 홍수터를 포함하고 있는 자연하도구간에 대해서는 통상 수리학적 하도 추적방법으로 이를 적절히 분석하기 곤란함에 따라 오히려 단순한 수문학적 하도 추적 방법이 더욱 실제와 가까운 결과를 가져올 수 있다고 지적하고 있다.

한편, 근래 수리 모델링 기법의 급속한 발전으로 복잡한 하도의 형태와 하도 단면 변화에 따른 에너지 손실 등을 적절히 표현할 수 있게 됨에 따라 HEC-RAS, UNET, RMA2와 같은 1, 2 차원 수리학적 모형들은 홍수터를 포함한 복잡한 하도 구간에서 발생하는 여러 가지 수리 현상들을 상세하게 분석 파악할 수 있는 좋은 도구가 되고 있다(우효섭, 2001).

2.9 계획홍수량과 계획홍수위 조정

1) 계획홍수량 조정

유역종합치수계획과 하천정비기본계획의 규모의 차이로 인한 홍수량산정에 차이가 발생할 수 있음은 앞의 2.1에서 밝힌 바 있다. 두 계획에서 모두 홍수량과 홍수위를 계산하지만 그 규모와 목적이 서로 다르다. 유역종합치수계획에서는 분류 위주로 검토하는 것으로 유역 전체를 조명해 보는 거시적인 안목에서의 검토이므로 숲을 보는 것과 같은 이치이다. 반면에 하천정비기본계획에서는 해당 하천 위주로 검토하게 되므로 해당 하천 유역만을 조명해 보는 미시적인 검토로서 숲이 아닌 나무를 보는 것과 같은 이치이다.

비록 유역종합치수계획에서 홍수량과 홍수위가 검토되지만, 하천정비기본계획에서도 반드시 별도로 홍수량과 홍수위가 검토되어야 한다. 최근 업계가 수행 중인 일부 용역 중에서 홍수량 산정에 대한 비용이 거

의 계산되지 않은 예가 발생한 바 있으나, 이 같은 과오는 다시는 일어나서는 안 될 것이다. 그 과업에서도 홍수량과 홍수위를 검토하는데 매우 많은 노력이 소요된 바 있으나, 자체 인력을 사용하여 비용 처리없이 문제를 해결한 것으로 알려져 있다.

홍수량 산정값은 분할된 소유역의 크기에 따라서도 달라진다. 특히 이런 경향은 유역종합치수계획에서 계산된 값과 하천정비기본계획에서 계산된 값에 차이가 발생하는 또 다른 원인이 되고 있다. 최소한 본류와 합류되는 지점에서 그 차이가 크지 않도록 하기 위한 소유역 구분에 대한 범위의 제시가 필요하며 하천정비기본계획에서도 합류점에서의 홍수량은 본류에서 구한 값(유역종합치수계획에서 고시된 값)으로 채택하여야 할 것이다. 이 경우 해당 하천의 하천정비기본계획에서 구한 값이 본류의 합류점 값 보다 크다면 그 차이 나는 값은 유역저류분담으로 계획하여야 할 것이다.

홍수량 차이가 과도하게 큰 경우에는 정밀 분석하여 유역종합치수계획의 본류 고시 값을 재검토하여야 할 것이다. 유역종합치수계획과 하천정비기본계획은 같은 10년 주기 재작성 계획이지만 검토 시기가 달라 발생할 수 있는 차이도 생각해야 하므로 고시 값을 재검토하거나 향후 유역종합치수계획 수립시에 반영하도록 하여야 할 것이다. 차이 값이 몇 % 이상일 경우에 어떠한 조치를 취해야 하는지에 대한 문제도 앞으로 검토가 필요하다고 사료된다. 유역종합치수계획에서 분석한 내용에 명백한 하자가 발견되는 경우에는 이를 보완하기 위한 조치가 하천정비기본계획에서 다루어져야 할 것이다. 물론 이런 상황은 발생하지 말아야 하지만 실무에서는 발생할 수도 있다고 보아야 할 것이다.

2) 계획홍수위 조정

가. 합류부 기점홍수위

유역종합치수계획이 수립된 본류구간으로 유입되는 지류의 합류부 기점홍수위는 유역종합치수계획에서 산정된 홍수위를 채택하는 것을 원칙으로 하여야 할 것이다. 해당 유역의 치수계획상 기점홍수위를 높여 채택하는 것은 가능할 것이다. 그러나 기점홍수위

를 유역종합치수계획상의 수치보다 낮추어 채택하는 것은 바람직하지 않다고 사료된다. 특별한 문제가 발생하는 경우에는 위의 계획홍수량 조정 방법에 준하여 결정할 수 있을 것이다.

나. 각 지점 계획홍수위

과거에 계획홍수위가 고시된 지점일 경우 새롭게 계산된 값을 채택하는 것을 원칙으로 하는 것이 바람직하다고 사료된다. 기존 계획홍수위가 새로 계산된 홍수위보다 낮은 경우에는 반드시 새로 계산된 값을 채택하여야 할 것이다. 기존의 계획홍수위가 새로 계산된 값보다 높은 경우, 주변의 여건을 고려하여 계산된 값보다 약간 높은 값을 택하는 것도 고려할 수 있을 것이나 이 경우에는 기술적, 학문적으로 타당성이 제시될 수 있어야 할 것이다. 기존의 계획홍수위가 새로 계산된 값보다 높기는 하지만 많은 차이가 나지 않는 경우에는 기존의 계획홍수위를 채택할 수 있을 것이다. 그러나 이 경우에는 기존 제방고가 이미 기존 계획홍수위를 고려하여 축조되어 있는 경우라면 할 것이다.

2.10 수리·수문분석의 정도를 높이기 위한 당면과제

유역종합치수계획을 수립하기 위하여 강우량을 분석하고 홍수량을 산정하게 되며, 산정된 홍수량은 하도가 감당할 수 있는 부분을 제외하고는 유역에서 감당하도록 대책을 수립하게 된다. 만일 산정된 홍수량 값이 과다 산정되었다면 그만큼 이에 대한 대비책 마련에 많은 투자가 뒤따르게 되는 것이다. 그러므로 가용한 각종 수문자료를 최대한 입수하고 이를 분석할 뿐만 아니라 최신의 모의기법을 동원하여 적절한 홍수량을 산정하고자 노력하고 있다. 그러나 현재 우리가 해결하지 못하고 있는 문제점들이 있어 이들 문제점을 짚어 보고자 한다.

1) 강우의 증가성향에 대한 적용방안 마련

현재까지 여러 하천에 대한 유역종합치수계획을

수립하면서 매년 강우분석이 이루어진 바 있다. 이들 분석의 공통적인 특징은 강우가 과거보다 최근에 더 많이 내리는 경향성이 있는 것으로 분석하고 있으나, 실제로 실무에서 이 같은 경향성을 통계학적으로 증명하지 못하고 있어 강우의 증가성향이 홍수량산정에 적절히 반영되지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 학계에서는 강우의 증가 경향성을 통계학적으로 규명하기 위한 연구를 실시하여 계획에 어떻게 적절히 반영해 줄 것인가를 제시해 주어야 할 것이다.

2) 강우의 방향성 분석

유역에 따라서는 강우가 상류에서 시작하여 하류로 진행하게 되면서 많은 홍수량을 발생시키는 경우가 있어 이에 대한 분석과 정리가 필요하다. 영산강의 경우 강우의 진행방향은 통상 하류에서 상류로 진행되는데, 가장 많은 피해를 입힌 1989년의 집중호우는 진행방향이 상류에서 하류로 진행된 경우이다. 이같이 강우의 진행방향이 상류에서 하류로 진행되는 경우에는 하류로 많은 홍수량을 발생시키게 되지만 현재로서는 이같은 효과를 계획에 반영하지 못하고 있어 이에 대한 분석과 반영 방안의 제시가 필요하다.

3) 기존의 수문관측소에 대한 평가

유역내에 수문관측소가 많은 경우라도 각 관측소가 가지고 있는 자료의 관측기간이 짧거나 관측자료의 질이 낮아 통계적으로 부적합하다고 판단하여 많은 관측소의 자료들이 활용되지 못하는 경우가 많은 실정이다. 이같이 관측기간이 짧은 기간의 자료에 대한 활용을 실무에서 어떻게 반영할 것인가에 대한 연구와 지침이 필요하다. 또한 각 관측소의 자료를 정밀 검토하는 과정에서는 해당 관측소의 문제점을 파악하게 되지만 이 같은 문제점들이 해당 관측소의 관측업무에 연계되지 못하는 것도 엄연한 현실이다. 그러므로 유역종합치수계획이나 하천정비기본계획 또는 재해영향평가와 같은 각종 과업의 수행시에 각 관측소의 문제점들이 제대로 적시될 수 있도록 하고, 지적된 사항들은 관측업무에 반영되어야 할 것이다.

4) 기존의 댐 및 농업용저수지 등에 대한 평가

유역내에 있는 댐이나 농업용저수지 등에 대한 각종 자료들은 대부분 설계시에 분석된 수치들이므로 유역종합치수계획을 수립하면서는 기존의 이들 값들을 정밀 분석하여 재평가하는 작업이 필요하다. 비록 이 같은 작업이 번거롭고 기존의 관리주체와 마찰이 발생할 수도 있는 일이라는 하지만 최신의 기법으로 기존 시설물들의 설계치들을 재평가하고 이들 값을 모의에 적용함으로써 해당 시설물은 물론 하류의 흐름을 올바르게 분석해 볼 수 있기 때문이다. 또한 재평가한 결과가 기존의 수치들과 다르거나 운영 방법 등에 문제가 있다고 판단되는 경우에는 홍수방어대책이 수립되어 확정되기 전이라도 이들 시설물의 운영관리 등의 문제점이 개선되도록 방향을 제시해 나가야 할 것이다.

3. 결론 및 발전방향

수문학은 자연을 대상으로 하고 있다. 자연의 특성을 추정하고 또한 자연현상을 단순화하여 모델링하는 과정에는 많은 불확실성과 오류가 포함될 수 있다. 그리고 정답이 없는 경우도 생길 수 있는 것이 사실이다. 그러나 수문학은 자연과학이면서 동시에 공학이다. 끝없는 연구와 논쟁의 소지를 내포하고 있지만 합리적이고 일관성 있는 범위와 한계를 정할 수 있다는 의미이다.

그런 의미에서 홍수량산정에 대한 가이드라인이나 지침서가 조속히 마련될 필요가 있다고 하겠다. 모든 것을 망라할 수 없을 것이나 중요한 매개변수나 모델링 방법 등을 표준화하여 더 이상 소모적인 혼란이 발생하지 않도록 해야 할 것이다. 이러한 지침서는 실무 엔지니어의 경험과 현장의 여건을 최대한 반영할 수 있는 flexibility와 현재 가용한 업계와 학계의 기술수준 및 자료의 가용성을 고려해야 하며, 수문분석의 객관성과 일관성 및 재현성(reproducibility)을 확보할 수 있는 기준과 절차를 제시하여야 할 것이다. 이를 위해서 건교부에 실무 업계, NGO, 관, 연구

소, 학계 공동의 홍수량산정표준화위원회(가칭)를 신설 운영하여 홍수량산정지침서의 작성과 업데이트 및 유권해석을 지속적으로 담당하도록 하는 방안도 검토해 볼 만하다고 사료된다.

금번에 신설된 하천정보센터를 중심으로 수문관측망의 확충과 자료의 체계적 구축 및 제공 등 수문조사분야와 임의시간환산계수, ARF, 유출곡선지수, 매개변수 산정 등 미흡한 기초분야에 대한 획기적인 연구와 투자가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본 고에서는 홍수량산정과 관련된 많은 문제들 중에서 특히 논란의 소지가 많거나 현장에서 어려움을 겪고 있는 사항들을 중심으로 문제점과 방향을 고찰하고자 하였다. 이러한 문제는 어느 한 기관이나 개인이 독단적으로 기준을 결정하기 보다는 다양한 의견수렴과 토론을 거쳐서 결정되어야 할 것이며, 본고가 이를 위한 촉매제의 역할을 할 수 있기를 기대해 본다.

참고문헌

- 건설부(1988). 한국확률강우량도 작성.
- 건설교통부(2000). 지역적 설계강우의 시간적 분포.
- 건설교통부(2000). 한국의 주요 호우.
- 건설교통부(2000). 한국확률강우량도 작성.
- 건설교통부(2002). 우리 가람 길라잡이.
- 건설교통부(2002). 하천설계기준.
- 건설교통부(2003). 한국수문조사연보.
- 건설교통부(2004). 하천정비기본계획수립 및 하천대장 작성 지침.
- 김남원, 원유승(2004). “우리나라의 빈도홍수량의 추정,” 한국수자원학회논문집 Vol. 37, No. 12, pp.1019~1032, 한국수자원학회.
- 박창근(2003). 2003년 태풍 매미로 인한 재해특성 및 조사 보고서, 제3장 강원중, 북부 및 내륙, 한국수자원학회.
- 오경두(2004). 도시 배수계통의 설계기술 개발 : 불투수 면적을 고려한 도시유역 CN 산정 연구, 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-02, 도시홍수재해관리기술연구사업단.
- 우효섭(2001). 하천수리학, 청문각.
- 윤용남, 안재현, 이상렬(2004). 도시하천 유역종합 치수 계획 수립기술 : 2. 설계강우의 시간분포방법 검토, 건설교통부/한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업 FFC03-14, 도시홍수재해관리기술연구사업단.
- 임상준, 박승우(1997). “논의 유출곡선번호 추정,” 한국수자원학회논문집, Vol. 30, No. 4, pp.379~387, 한국수자원학회.
- 정중호, 금중호, 윤용남(2002). “도달시간 산정 방법의 개발,” 한국수자원학회논문집, Vol. 35, No. 6, pp.715~727, 한국수자원학회.
- 환경부(1999). 인공위성영상자료를 이용한 토지피복분류.
- 환경부(2002). 인공위성영상자료를 이용한 토지피복 지도 구축.
- Dodson & Associates, Inc.(1995). ProHEC1 Plus Program Documentation.
- John Peters(1993). Flood Plain Hydrology Using Computer Program HEC-1 on IBM Compatible Personal Computers : Lecture #6 Unit Hydrograph Development, HEC-1 Course - University Extension, U.C. Davis.
- National Research Council Canada(NRCC) (1989). Hydrology of Floods in Canada : A Guide to Planning and Design, Editor W.E. Watt.
- The Institute of Engineers, Australia(IOEA) (1987). Australian Rainfall and Runoff : A Guide to Flood Estimation, Editor D.H. Pilgrim, Vol. 1.
- USDA SCS(1986). Urban Hydrology for Small Watersheds, TR-55.
- WMO(1994). Guide to Hydrological Practices, Vol. II, Analysis, Forecasting and Other Applications, WMO-No. 168, Geneva, Switzerland.