

서울시립대학교 도시과학연구원
도시과학논총 제29권 2003년 12월
The Journal of Urban Sciences
The University of Seoul
Vol. 29, No.1, December 2003

도로배수 시설물의 유출량 산정방법 분석 및 수문학적 설계홍수량 산정방법의 적용

박 대 형 · 문 영 일¹

(서울시립대학교 토목공학과 박사과정, 부교수)

The Study of Design Flood for Road Drainage System and Hydrologic Applications

Park, Dae Hyeong · Moon, Young Il

ABSTRACT

The design of flood volume for road drainage system is a crucial criterion for smooth pumping out of discharges. Thus, the design flood for road drainage system, according to recurrence interval of the probable precipitation, is an important factor to determine the capacities of culvert, side way water conveyance systems, water collecting facilities, and water conduit pipes. Hence, precise design of flood volume enables to aid the conservation of the function of road facility systems, prevention of the ground foundations, and surface water bailing. However, current guidelines and standards for road system design provide insufficient and outdated flood volume models, and need for a revision. Also, hydrologic flood design models should be applied for a better and reliable analysis.

This paper investigated current guidelines and standards for road system design, and tried to find out the problems. And alternative choice for better design flood models by introducing hydrologic models is presented by using practical case applications.

Keywords: design flood, road drainage system, and hydrologic models

¹ corresponding author, ymoon@uos.ac.kr

I. 서 론

설계홍수량은 “하천설계기준(한국수자원학회, 2002)”에 의하면 “홍수특성, 홍수빈도 그리고 홍수피해 가능성과 사회·경제적 요인 등을 함께 고려한 후, 최종적으로 어떤 수공구조물의 설계 기준으로 채택하는 첨두 유량이나 첨두수위, 또는 설계강우에 따른 유량수문곡선”을 말한다. 이러한 설계홍수량 산정은 수문학과 마찬가지로 도로배수설계에 있어서도 원활한 배수의 소통을 위하여 필수적인 요소이다. 도로배수에 있어서 설계홍수량은 재현기간에 따른 설계강우에 의해 측구, 도수로, 집수정, 배수관 및 배수암거 등의 도로배수시설의 소통용량을 결정하는 주요한 인자이다. 따라서 정확한 설계홍수량이 산정됨에 따라 도로시설물의 기능 보존, 지반 지지력의 약화 방지, 노면 배수의 원활함, 지표수 흐름의 방해로 방지할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

현재 국내의 도로배수 설계에서 설계홍수량 산정 방법은 도로설계요령(1976, 한국도로공사)을 근간으로 1996년과 2001년에 개정이 있었고, 도로설계편람(2000, 건설교통부), 도로설계기준(2001, 건설교통부) 등의 지침이 마련되어 있다. 그러나 오래 전에 제시된 유출량 산정방법이 개선되지 않고 그대로 사용되어 설계홍수량을 산정하고 있을 뿐만 아니라, 이러한 방법이 수문학 분야에서 사용되고 있는 설계홍수량 산정 방법과 많은 차이점을 보이고 있고, 현행의 설계홍수량 산정 방법은 개략적인 방법을 통해 부정확한 결과값을 보이고 있으므로 설계홍수량 산정 방법의 보완이 시급한 실정이다.

또한 미국의 “Highway Drainage Guideline

(American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999)” 등의 선진 외국 사례를 보아도 소유역에서는 합리식을 사용하여 유출량을 산정하고 있으나, 중규모 이상의 유역에서는 지점이나 지역 빈도해석, RRL(Road Research Laboratory) 방법, NRCS TR 55 방법, Snyder 방법 등의 수문학적 방법들을 이용하여 설계홍수량을 산정하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 현재 국내에서 적용되고 있는 도로배수 설계의 설계홍수량 산정방법들에 대하여 조사하고, 그에 따른 문제점을 분석하였고, 또한 개선방안으로서 수문학에서 응용되는 강우-유출 모형을 이용한 설계홍수량 산정방안을 제시함으로서 문제점에 대한 대안을 제공하고자 한다.

이를 위하여 현행 설계홍수량 산정방안과 개선 강우-유출 모형을 이용한 설계홍수량 산정방안을 유역면적 2,703 km² 인 소양강댐 유역에 실제 적용하여 비교하여 보고 두 방안에 대한 결과값을 실제 관측치와 비교하여 강우-유출 모형에 의한 설계홍수량 산정방안의 우월성을 검증하였다.

II. 현행 도로배수 설계홍수량 산정방법

현행 도로배수설계에 있어 설계홍수량 산정 방법은 서론에서 언급된 여러 편람과 기준이 동일한 방법을 사용하고 있는 것으로 파악되었다. 즉, 유역을 크기에 따라 소규모, 중규모, 대규모 유역으로 구분하고 각각 합리식, 표준유출법, 그리고 수문곡선추적법을 이용하여 설계홍수량을 산정하고 있으며, 적용방법은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 합리식

유역면적이 4.0 km^2 이하일 때 적용되는 합리식은 다음과 같다.

$$Q_d = 0.2778 \text{ gC gI gA} \quad (1)$$

이 방법은 유출계수 C와 강우강도 I, 그리고 유역면적 A에 따라 첨두유출량을 계산하는 방법이다. 따라서, 피복상태의 면적을 가중인자로 하는 가중평균 유출계수를 구하고, 홍수도달공식을 이용하여 도달시간을 산정한 후 이를 강우 지속시간으로 삼아 강우강도식과 IDF(Intensity-Duration-Frequency) 곡선을 이용한 강우강도 I를 구한 뒤, 유역면적을 이용하여 유출량을 산정한다.

(2) 표준유출법

$4.0 \text{ km}^2 < \text{유역면적} < 40.0 \text{ km}^2$ 일 때 사용되는 표준유출법은 다음과 같다.

$$Q_d = \text{RF gLF gFF gQ} \quad (2)$$

이 방법은 전국을 7개의 수문지역으로 나누고 지역별 강우계수인 RF(Rainfall Factor)와 지표면 상태 계수인 LF(Land Factor), 생기빈도계수 FF(Frequency Factor)를 구한 후, 유역면적에 따른 표준유출곡선을 적용한 유량 Q의 값을 곱한 값이다. 따라서 비록 RF, LF, FF, Q 등의 인자들을 고려하고는 있으나, 한 장의 표준유출을 도면상에서 모든 계산이 수행되고, 또한 전국을 7개의 대략적인 수문지역으로 대분류함에 따라 정확한 유출량의 계산이 어렵다.

(3) 수문곡선추적법

유역면적이 40.0 km^2 이상일 때에는 수문곡선추적법이 사용되고 있다. 이 방법 또한 전국을 7개 수문지역으로 구분하고 각 지역에 대한 수정수문곡선을 이용하여 유역면적

과 생기빈도에 따른 유출량을 산정한다. 수문곡선 추적법 또한 개략적인 방법으로서 지표면 상태, 강우강도, 선행 강우의 영향, 토양 특성 등의 유역 특성을 반영하지 못하여 개략적인 유출량 값을 산정하고 있다.

III. 현행 도로배수시설의 설계홍수량 산정방법의 문제점

현행 도로배수 설계홍수량 산정방법은 이와 같이 유역 크기에 따른 계산법을 일률적으로 적용하고 있으나 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 파악된다.

(1) 지속기간에 대한 개념 부재

설계강우는 보통 재현기간, 지속기간, 강수량 또는 강우강도의 시간적 분포 등의 성분으로 기술된다. 또한 IDF 곡선을 통해 설계강우를 얻고자 할 때 지속시간의 결정은 매우 중요한 사항이 된다. 일반적으로 지속기간이 길수록 강우강도는 약해지고, 또한 유역면적이 넓어질수록 강우강도는 약해지는 관계를 지니고 있으나, 현행 설계홍수량 산정 방법에는 이러한 지속기간의 개념이 존재하지 않는다. 즉, 총 유출량(예를 들어 $10,000 \text{ m}^3/\text{sec}$)이 아무리 크다 하여도 지속기간이 긴 강수량(48시간)이라면 첨두유출량은 감소할 수 밖에 없으며, 반대로 작은 유출량($500 \text{ m}^3/\text{sec}$)이 발생하여도 짧은 지속기간(10분)의 강우로 인하였다면 이로 인한 피해는 클 수 밖에 없다. 따라서 IDF 곡선이나 강우강도식으로부터 설계강우를 산정할 때 지속시간의 결정은 매우 중요한 역할을 담당하고 있으나, 중·대규모 유역에 있어서 설계홍수량을 산정하는 표준유출법 및 수문곡선추적법에서는 이러한 강우의 지

속기간의 개념이 없이 곧바로 유출량만을 산정함에 따라 문제점이 있다.

(2) 유역 특성에 따른 영향 미고려

현행 설계홍수량 산정에는 유출에 영향을 주는 유역 면적, 유역 경사, 유역 방향성과 형상 및 고도, 수계 조직의 구성 양상 등의 지상학적 인자에 대한 영향이 무시되고 있다. 또한 저수지, 호수, 홍수터, 늪지대의 존재여부, 토지이용 상태, 유역의 침투능 및 지하수 저장 능력 등의 유역 특성에 대한 고려가 없으므로 유출량 산정 대상지역의 설계홍수량은 매우 개략적인 방법을 통해서 산정되고 있다.

이러한 유역 특성은 유출량에 매우 중요한 역할을 담당하게 된다. 예를 들어 불투수 면적이 대부분을 차지하는 도시지역에서의 유출 특성은 임야, 전답, 삼림으로 피복되어 있는 자연지역에 비해 확연히 다른 유출 특성을 나타낸다. 즉, 도시지역에서는 매우 조밀한 도로배수 계통을 가지게 되며, 이에 따라 불투수면을 따라 노면배수가 급속히 이루어지고, 우수 및 하수관거에 의해 우수가 강제배제됨에 따라 어느 한 배수구에 있어서 유출은 급속하게 많은 양이 일시에 몰려드는 특성을 가진다. 또한 일시에 몰려드는 유출을 저감시키기 위한 우수유출 저감 시설이나 펌프장, 홍수터 관리상태 등도 도시유출의 특성을 변화시키는 주요 인자이기도 하다. 그러나 자연지역에서는 이와는 반대로 산지면과 전답 등에 떨어진 강수가 일부는 침투되고, 나머지 유효강우량이 조도면이 거친 지표면을 따라 도로 배수구에 유입됨에 따라 도로배수 유입구에 도달하는 유출은 첨두량이 작고, 유입구까지의 도달 시간도 도시지역에 비해 늦은 특성을 가진

다.

따라서, 이러한 유역특성의 고려가 설계홍수량 산정에는 필히 반영되어야 할 항목이나, 현행 도로배수 설계홍수량 산정 방법에 있어서는 이러한 고려가 전혀 없다.

(3) 유출수문곡선에 대한 고려 부재

수문곡선은 첨두유량과 첨두시간을 알려줄 수 있을 뿐만 아니라 유출의 양상을 파악할 수 있는 자료로서 특히 상승부는 강우 성격이나 유역의 형상에 따라 달라지는 특성을 가진다. 이러한 수문곡선의 파악이 가능하다면 상승시점에서 첨두부까지 이르는 첨두시간의 파악에 따라 설계홍수량의 산정과 더불어 도로의 안정성 파악에도 기여를 할 수 있다. 통상 상승부에서 첨두유량까지 이르는 시간까지의 유속은 감수부의 유속과 비교할 때 빠르게 나타난다. 특히 도시하천에서의 유출양상은 첨두시간이 단축되고, 첨두유량 또한 자연하천에 비하여 크게 나타나는 특성이 있으므로, 수문곡선의 양상을 파악함에 따른 도로의 지반 침하 특성이나 압밀상태의 점검 등이 필수적이다. 그러나 현행 유출량 산정방법은 첨두유출량만을 산정함에 따라 유출의 특성을 파악하고 있지 못하므로 개선의 여지가 있다.

(4) 임계 지속시간의 개념 부재

임계지속시간이란 하천설계기준(2002)에 따르면 “최대첨두유량과 최대저류비(유수지에 저류되는 용적량 / 총유출 용적량)를 발생하는 지속시간”으로 정의되며, 임계 지속시간은 배수시스템에 가장 큰 부하를 야기시키는 지속시간이다. 도로배수와 같이 구조물의 용도가 하류로의 방류량 조절, 홍수량의 원활한 소통과 같은 치수용도의 구조

물인 경우에는 도로배수 시설물에 침투유량이 도달하는 시점을 임계 지속시간으로 보아야 할 것이며, 설계홍수량의 산정에 있어서도 IDF곡선을 통한 재현기간-지속시간별 강우강도가 도로배수 시설물에 최대의 유입량이 들어오는 시점을 임계 지속시간으로 보아야 한다. 그러나 현행 도로배수 설계홍수량 산정방법에 있어서는 이러한 임계 지속시간의 개념이 포함되어 있지 않다. 도시화가 진행된 유역에 있어서는 한 개의 배수 시설물이 차지하는 유역면적이 매우 작으므로 도달시간과 임계 지속시간의 개념을 따로 구분하지 않아도 될 것으로 판단되나, 특히 자연유역에 위치한 고속도로, 교량 등의 배수 시설물에 있어서는 이러한 임계 지속시간의 개념이 매우 중요하게 적용될 것으로 사료된다.

IV. 개선 설계홍수량 산정방안

개선 설계홍수량 산정방법으로는 수문학적 방법들이 적용될 수 있다. 즉, 빈도해석에 필요한 유출량 자료가 충분히 존재하는 지역에서는 지점의 직접적 빈도해석에 의한 방법이 있고, 또한 지점의 유출량 자료가 충분치 못한 경우에는 수문학적 동질성이 확보된 유역의 유출량 자료까지 포함하는 지역빈도해석, Index-flood, 또는 다중회귀 분석을 통한 홍수빈도해석이 가능하다. 또한 유역의 대표단위도가 존재하는 경우에도 유효유량 산정을 통한 유출량 산정이 가능하다. 그러나 국내의 실정과 같이 유출량 자료 확보가 어려운 미계측 유역의 경우에 있어서는 자연유역에서 강우-유출 모형을 이용하는 합성단위유량도법을 이용하거나, 도시지역에서는 RRL, ILLUDAS, SWMM 등

의 방법이 적용될 수 있다.

V. 설계홍수량 산정 결과

(1) 개선 설계홍수량 산정방법의 적정성 검토

현행 설계홍수량 산정방법과 개선 방법의 비교에 앞서, 유역면적 $2,703 \text{ km}^2$ 의 소양강댐 유역에 있는 발생한 강우량을 대상으로 하여 소양강댐 유입부에서 관측된 실측 자료와 개선 설계홍수량 산정방법을 이용한 계산 결과를 비교하였다.

다음 <Fig. 5-1>은 인북천 유역, 내린천 유역, 그리고 소양호 유역의 3개 소유역으로 나누어진 소양강댐의 유역도이다. 따라서, 대상유역에 1995년 8월 23일~27일의 96 시간 동안 인북천, 내린천, 소양호 소유역에 각각 454.9, 236, 479.1 mm가 발생한 강우량을 이용하여 침투유량을 계산한 결과를 다음 <Table 5-1>과 같이 정리하였다.



<Fig. 5-1> 소양강댐 유역도

<Table 5-1> 개선 산정방안의 적용성 검토 결과

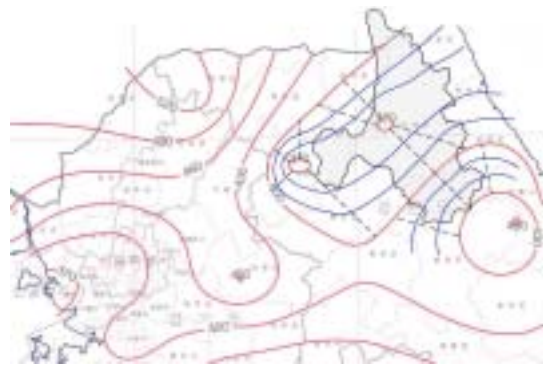
	소유역명	첨두유량 (m ³ /s)	첨두발생시 각
모의 값	인북천	2,179.5	8. 24. 11:00
	내린천	1,213.9	8. 25. 15:00
	소양호	2,693.5	8. 24. 12:00
	인북천-내린천 합 류점	3,166.6	8. 25. 13:00
	소양강댐 유입수문 곡선	5,497.6	8. 24. 12:00
관측 치	소양강댐 유입수문 곡선	5,661.0	8. 24. 13:00

산정된 계산결과를 소양강댐 유입부의 관측치와 비교하여 음영처리하여 나타내었다. 개선 강우-유출 방법을 통해 모의된 첨두유량은 5,497.6 m³/sec, 첨두발생시각은 8월 24일 12:00였으며, 관측된 자료는 첨두유량은 5,661.0 m³/sec, 첨두발생시각은 8월 24일 13:00로 매우 근접한 결과를 나타내어 적용성을 입증하였다.

(2) 현행 설계홍수량 산정 방법과 개선 설계홍수량 산정방법의 비교

본 절에서는 동일 대상유역에 대해 현행 설계홍수량 산정 방법과 개선 설계홍수량 산정방법에 따른 비교를 분석하였다. 비교방법은 대상유역에 24시간 지속되는 100년 빈도 강우량에 대하여 현행 유출량 산정방법과 개선 강우-유출 모형에 따른 유출량 산정 결과를 비교하였다. 대상유역인 소양강댐 유역은 인북천 유역, 내린천 유역, 소

양호 유역의 3개 소유역으로 구분되어 있으나, 각 소유역 면적이 <40 km² 이므로 현행 방법에서는 수문곡선추적법에 의해 설계홍수량을 산정하였다. 또한 비교대상이 되는 개선 설계홍수량 산정방법은 한국확률강우량도(2000)에 따라 다음 <Fig. 5-2>와 같이 유역을 위치시킨 후, 등우선에 따라 평균 확률강우량(389 mm)을 구하였다.



<Fig. 5-2> 지속시간 100분-100년 재현기간 강우량에 따른 유역 분할

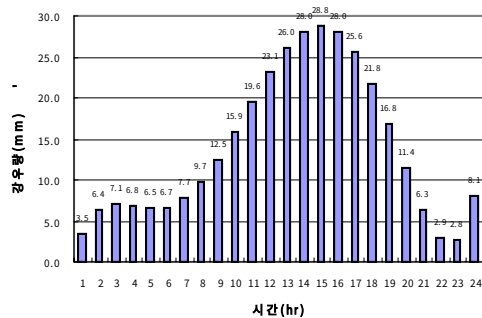
이와 같이 구해진 확률강우량은 지점의 확률강우량으로 이를 면적 확률강우량으로 전환시키기 위해서는 면적감소계수를 적용하여야 한다.

이때, 면적우량 환산계수(ARF)는 다음 식과 같이 주어졌으며, 매개변수 M, a, b는 각각 1.7808, 0.1646, 0.1124이고, 유역면적 A는 2,703 km²이다.

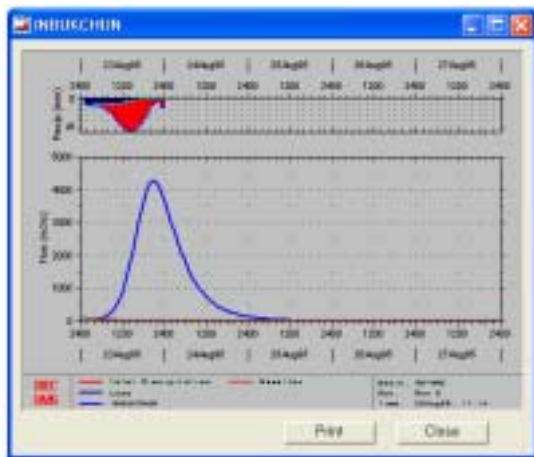
$$ARF(A) = 1 - M \exp[-aA^b]^{-1} \quad (3)$$

따라서 면적우량 환산계수는 0.8538이며, 이를 평균 확률강우량(389 mm)과 곱하여 소양강댐 유역의 면적확률강우량(332 mm)을 산정하였으며, 이를 소양강댐 유역에 임계지속시간이 가장 크게 적용되는 Huff 3분 위법을 통하여 지속기간 24시간 동안 다음 <Fig. 5-3>과 같이 분포시켰다.

또한 강우-유출 모형의 유효수량 산정은 NRCS(National Resources Conservation Service) 방법, 기저유량과 직접유출량의 분리는 감수곡선법을 적용하였고, 단위도는 Clark 단위도법을 사용하였고 HEC-HMS 프로그램을 이용하여 계산을 수행하였다. 다음 <Fig. 5-4>는 인북천 유역의 계산수행 과정을 나타낸 것이다.



<Fig. 5-3> Huff 3분위에 의한 강우분포



<Fig. 5-4> HEC-HMS에 의한 인북천 수행과정

계산 결과, 현행 설계홍수량 산정방법과 개선 설계홍수량 산정방법에 따른 각 소유역별 100년 재현기간의 강우에 대한 첨두유량은 다음 <Table 5-2>와 같다.

현행 설계홍수량 산정방법에 따른 24시간

지속-100년 빈도의 설계강우량에 대한 첨두유량은 인북천, 내린천, 소양호 유역에서 각각 1,850, 1,920, 1,650 m³/sec의 홍수량이 발생하였다. 또한 개선방법에 의한 24시간 지속-100년 빈도의 설계강우량에 대하여 설계홍수량을 산정한 결과는 인북천, 내린천, 그리고 소양호 유역에서 각각 4,271.5, 4,987.2, 5,145.9 m³/sec의 홍수량이 산정되었다. 이는 기존의 유출량 산정 방법인 수정수문곡선법에 의한 설계유량과 비교해 볼 때 두 배 이상의 차이가 생기는 큰 값이다.

<Table 5-2> 현행 및 개선방법에 의한 계산 수행 결과

소유역명		인북천	내린천	소양호
유역면적(km²)		923.8	1,069.3	709.9
24시간 지속 강우 모의결과 (개선)	강우량 (mm)	332	332	332
	강우지속 시간(hr)	24	24	24
	설계홍수 량 (m³/s)	4,271.5	4,987.2	5,145.9
수정수문곡선 법의 유출량 (현행)	강우량 (mm)	-	-	-
	강우지속 시간(hr)	-	-	-
	유출량 (m³/s)	1,850	1,920	1,650

이때, 앞 절에서 본 바와 같이 인북천 유역에서 92시간 지속강우의 강우량이 454.9 mm였던 경우에 2,179.5 m³/sec의 유량이 발생하였는데, 24시간 지속 강우의 강우량이 332 mm이면 수문곡선은 첨두유량이 많

아지고 침투시간은 단축되어 결국 설계홍수량은 훨씬 더 크게, 집중되리라는 결과를 예측할 수 있다.

또한 소양호 유역의 경우에 100년 빈도 설계강우량에 의한 홍수량은 $5,145.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로서 가장 큰 값을 지니는데, 이는 유역면적이 다른 소유역보다 작아 침투홍수량 발생시간은 다른 소유역보다 빠르며, 332 mm의 강우깊이에 의한 유출량이 일시에 몰려든 이유로 해석된다. 또한 내린천 유역은 유역면적이 다른 소유역보다 넓어 도달시간으로 인한 침투발생시간은 제일 느린 반면에 비유량은 크게 나타난다.

그러나 강우량과 지속시간의 개념이 포함되지 않은 채로 생기빈도와 유역면적의 크기만을 고려한 현행의 설계홍수량 산정방법은 홍수량 산정 방법의 이론적 배경이 부족할 뿐 아니라 침투유량의 산정에 있어서도 크기가 매우 적게 산정됨에 따라 정도가 떨어짐을 알 수 있다.

이와 같이 강우-유출 모형에 의한 개선 설계홍수량 산정방법과 기존의 수정수문곡선법에 의한 유출량 산정결과를 비교해 본 결과, 강우-유출 모형의 모의에 의한 설계홍수량이 더 합리적이고 정확한 결과값을 산정해 낼 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 현행 도로배수의 설계홍수량 산정방법의 보완을 위해 강우-유출 모형을 이용한 개선 방안을 제시하였다. 먼저 개선 설계홍수량 산정방법인 강우-유출 모형을 이용한 합성단위유량도법의 적용성을 관측자료와 비교하여 검증하였다. 이러한 검증을 거쳐 개선 방법의 적용성을 확인한 후

소양강댐 유역에 적용시켜 현행 방법과 개선 설계홍수량 산정방법을 비교하였는데, 현행 방법이 매우 과소하게 설계홍수량을 산정하고 있음을 입증하였다.

소유역에 있어서 사용되는 합리식은 사용이 용이한 방법이나 도달시간의 산정이라든지 유출계수의 선택값에 따라 유출량이 차이를 나타내므로 숙련된 기술자에 의해 현재에도 적절히 사용될 수 있는 방법으로 판단된다. 또한 도시지역에서는 배수구가 매우 조밀하게 이루어져 있고 한 개의 배수구가 차지하는 유역면적도 매우 작으므로 합리식을 적용시키기에는 별다른 문제점이 없을 것으로 판단된다. 그러나 중규모나 대규모 유역에서 현재 사용되고 있는 표준유출법과 수문곡선추적법은 지속시간의 개념이나 유역특성에 대한 고려, 임계지속시간의 개념이 부재하여 이론적 배경이 부족할 뿐 아니라 설계홍수량 산정에 있어 매우 미흡한 결과를 보이고 있으므로 개선이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 이러한 문제점을 수문학적 강우-유출 모형을 적용함으로써 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

<참고문헌>

1. 건설교통부, 1999년도 수자원관리기법연구조사 보고서, 2000. 6.
2. 건설교통부, 도로설계편람, 2000.
3. 건설교통부, 도로설계기준, 2001.
4. 하천설계기준, 한국수자원학회, 2002.
5. 한국도로공사, 도로설계요령, 2001.
6. Highway Drainage Guideline, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1999