

## 합리식의 확률론적 해석과 유출계수의 적용에 관한 연구

# A Study on Probabilistic Analysis of the Rational Method and Application of Runoff Coefficient

최한규\* 김남원\*\* 윤상진\*\*\*  
Choi, Han-Kuy Kim, Nam-Won Yoon, Sang-Jin

### Abstract

The rational method of estimating peak flow is used largely for the simplicity. But the accuracy of rational method is not easy to estimate, because the rational method is analyzed by the deterministic point of view and the runoff coefficients of the rational method are proposed from other countries.

In this study the rational method is analyzed by the probabilistic way to be a more reliable method. The runoff coefficient is regarded to parameter that changes the probabilistic rainfall to the peak flow. The runoff coefficient for each return period is analyzed to be a reliable index which is used to estimate the peak flow of ungauged natural catchments.

키워드 : 합리식, 유출계수, 재현기간

Keywords : rational method, runoff coefficient, return period

### 1. 서론

수문학에서의 주된 관심사는 하천유량의 특성을 정량적으로 분석하여 올바른 예측을 통해 수자원의 최적이용 및 관리를 도모하는 것인데 그 중에서 치수목적은 달성하는데 초점을 두고 있는 것이 바로 비교적 짧은 기간에 걸쳐 발생하며 인간에게 막대한 피해를 주는 홍수의 특성분석이다.

따라서 홍수로 인한 피해를 줄이기 위해서 홍수량의 추정은 대단히 중요하다고 할 수 있으며 홍수량 추정 방법 중 가장 정확한 방법은 대상유역의 홍수량 자료를 이용하여 확률분석하는 것이다.

하지만 국내의 경우 홍수량 자료의 부족으로 미계측 유역에서는 대부분 간접적인 방법을 사용하고 있으며, 이중 가장 많이 사용되고 있는 방법이 강우-유출모형의 하나인 합성단위유량도법으로 확률강우량, 설계강우의 시간분포, SCS 유효우량산정, 단위유량도의 과정을 이용하며 홍수량추정 방법 중에서 비교적 정확한 것으로 알려져 있다.

또 침투홍수량 산정방법 중에서 소유역의 홍수량 추정에 널리 이용되고 있는 방법이 합리식이다. 공식이 간단하여 전문적인 지식이 없어도 사용하기 간편한 장점은 있으나 합리식의 매개변수가 대부분 국외에서 제안된 것이고 이를 그대로 사용하거나 약간 수정하여 사용하기 때문에 국내에 적용할 경우 이 공식에 의한 홍수량추정치의 정확성에 대해서는 무엇이라고 논의할 수 없는 실정이라고 할 수 있다. 이는 지금까지 합리식을 확률론적인 관점에서 해석하여 유출계수를 유역특성에 따라 국외에서 제시한 매개변수를 사용자의 주관에 따

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

라 구분별하게 사용하였기 때문이라고 판단된다.

따라서 설계상황에 있어서 합리식을 좀더 신뢰성 있는 홍수량추정방법으로 정립시키기 위해서는 기존의 확률론적인 관점에서 볼 것이 아니라 합리식을 설계상황에 알맞게 해석하고 합리식의 매개변수 중 하나인 유출계수를 국내의 자료를 이용하여 확률론적인 관점에서 분석하는 것이 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 합리식에서의 유출계수를 강우량을 홍수량으로 변환시켜주는 통계적인 매개변수로 인식하여 국내 가용한 강우량과 홍수량 자료를 이용하여 유출계수를 확률론적으로 분석·제시하여 이를 미계측 유역의 홍수량 추정시 신뢰성 있는 지표로 활용하고자 한다.

따라서 기존의 확률론적 측면이 아닌 통계적 또는 확률론적인 측면에서 합리식을 재해석하였다.

확률론적 합리식의 매개변수를 추정하기 위해 선정된 유역은 국제수문개발계획의 일환으로 운영하고 있는 IHP유역 중 평창강 유역이며, 대상유역의 강우량과 홍수량 약 20년 자료를 수집하여 다음과 같은 내용으로 연구를 수행하였다.

(1) 기존의 확률론적 합리식의 이론과 그 문제점에 대해서 살펴보고, 확률론적 합리식의 이론과 타당성에 대해서 고찰하였다.

(2) 확률론적 합리식의 매개변수를 추정하기 위해 대상유역의 실측 홍수량자료와 실측강우자료를 수집하여 L-moment에 의한 Type-I 극치분포(Gumbel)로 확률 분석을 실시하였다.

(3) 유출계수를 확률강우강도를 홍수량으로 변환시켜주는 매개변수로 인식하여 앞서 분석한 강우량과 홍수량 자료를 이용하여 대상유역에서의 재현기간별 유출계수를 유도하였다.

(4) 강우지속기간 공식 중에서 가장 일관된 유출계수를 도출한 공식을 본 연구의 강우지속기간을 위한 공식으로 선정하였으며 지표유출계수를 선정함으로써 이를 미계측 유역의 홍수량 추정에 적용하고자 하였다.

이렇게 도출된 결과를 미계측 유역의 홍수량추정에 적용하고자 한다.

하지만 본 연구에서와 같이 통계적 또는 확률론적으로 합리식을 재해석하여, 각 유출계수를 국내 자료상황에 맞게 제시하였다 할지라도 복잡한 수문과정을 간단히 유역면적과 강우강도로 나타내었기 때문에 합리식이 가지는 한계가 있으며, 설계강우-단위도법과 같은 다른 강우-유출모형보다 뛰어난 모형이라고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서 제안한 홍수량 추정방법은 단지 미계측 유역에서 어느 정도의 신뢰성을 가지고 재현기간별 침투홍수량을 추정하기 위한 방법이라는 것을 밝히고자 한다.

다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 기존의 합리식 해석

이 공식은 한 유역의 침투홍수량을 계산하는데 있어 그 사용이 간편하여 홍수량 추정 방법 중 중·소유역의 수문설계에 많이 이용되고 있는 방법으로 국내에서는 이 방법에 의해 추정된 설계홍수량에 대한 연구가 미진하여 외국에서 제시한 합리식의 매개변수를 그대로 사용하여 매우 주관적으로 보이지만 방법의 간편성과 편리성으로 인하여 많이 사용되고 있는 실정이다.

만약 작은 면적의 불투수 지역내에 일정한 강도의 강우가 도달시간보다 긴 시간동안 계속되면 침투유량은 도달시간부터 강우강도에 유역면적을 곱한 값과 같아질 것이다. 이것이 합리식의 기본가정이며 자연상태의 유역에 있어서는 침투현상에 의한 강우량의 손실이 필연적이므로 감소계수를 곱하여 침투유량을 산정하게 된다. 즉

$$Q = CAI \quad (1)$$

여기서 Q는 침투유량(ft<sup>3</sup>/sec), A는 유역면적(acre), C는 유출계수, I는 강우강도(in/hr)이다.

식 (1)을 합리식이라 부르게 된 이유는 식의 좌우변의 단위가 서로 일치하기 때문이다.

즉 1.008ft<sup>3</sup>/sec = 1in.acre/hr이므로 I를 in/hr, A를 acre단위로 표시하면 Q는 ft<sup>3</sup>/sec가 된다. 식(1)을 SI단위계로 표시하기 위해 A와 I를 각각 km<sup>2</sup>, mm/hr단위를 사용하면 단위환산계수를 곱하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q = 0.2778 CAI \quad (2)$$

여기서 유출계수 C는 유역면적의 크기나 유역의 피복특성에 따라 결정되는 상수로서 하천설계기준[1]에 나와 있는 합리식의 전제 조건을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 강우강도 I의 강우에 의한 홍수량 Q는 그 강도의 강우가 유역의 도달시간과 같거나 더 큰 시간동안 계속될 때 최대치에 도달한다.

(2) 강우의 지속시간이 유역의 도달시간과 같거나 길 때 강우강도 I인 강우에 의한 침투홍수량 Q<sub>p</sub>는 그 강우강도 I와 직선적 관계를 가진다.

(3) 침투 홍수량의 발생확률은 주어진 도달시간에 대응하는 강우강도의 발생확률과 동일하다.

(4) 유출계수 C는 각각 다른 발생확률을 가지는

강우-유출 사상에 관계없이 동일하다.

(5) 유출계수 C는 어떤 유역에 내리는 모든 강우에 대하여 동일하다.

첫 번째 전제 조건은 강우지속기간을 도달시간으로 설정한다는 가정과 관계있다고 볼 수 있으며 윤용남[2]에 의하면, 만약 일정한 강도의 강우가 불투수면에 강하하면 그 면으로부터의 유출율은 차차 증가하여 결국 강우강도와 동일하게 되어 평형상태에 도달하게 되는데 평형상태의 도달에 소요되는 시간은 강우로 인한 유수가 그 유역내의 가장 먼 지점으로부터 유출출구까지 도달하는 데 소요되는 시간인 도달시간과 같게 된다는 것이다.

세 번째 전제 조건인 침투홍수량의 발생확률과 강우강도의 발생확률이 동일하다는 가정은 도달시간에 대응하는 강우량이 발생할 수 있는 확률이 침투홍수량이 발생할 수 있는 확률과 같다는 의미로 해석될 수 있다. 즉 유역에서 강우에 의한 홍수량의 발생과 실제 홍수량의 발생이 같으며 이는 강우의 확률과 홍수량의 확률이 선형 또는 직선으로 거동한다고 보는 두 번째 전제조건과 합리식에서의 유출계수 C가 재현기간에 상관없이 일정하다고 하는 네 번째 전제조건을 이끌어낸다고 볼 수 있다.

합리식은 강우의 침투 및 요지 저류효과가 적은 도시화된 유역이나 소유역에 적용시 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있는데 이는 합리식이 저류효과를 무시하고 있고, 또한 강우강도가 일정하다고 가정하고 있기 때문이다. 즉 합리식으로 홍수량을 추정할 경우 이러한 가정을 만족할 수 있는 유역은 저류효과를 최소화시킬 수 있고 강우강도의 변화가 적은 소유역이 적당하기 때문이다.

합리식에서 홍수량을 추정하기 위한 강우강도 I는 유역의 도달시간 t를 강우의 지속기간 t로 잡고 설계하고자 하는 소규모 수공구조물의 목적과 중요도에 따라 강우의 허용 재현기간을 선택하여 강우강도-지속기간-재현기간 관계곡선(IDF)으로부터 결정하게 된다.

또한 IDF관계를 식으로 나타낸 확률강우강도식을 사용하여 결정할 수도 있는데 일반적으로 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$I(t) = \frac{a}{t^n + b} \quad (3)$$

여기서, I(t)는 강우강도(mm/hr), t는 강우지속기간(min), a, b, n은 각각 지역마다 산정되는 회귀상수를 나타낸다. 일반적으로 널리 알려진 3가지 경험식(Talbot, Sherman, Japaness형)의 회귀상수를 살펴보면 Talbot형은 n이 1, Sherman형은 b가 0, Japaness형은 n이 0.5이다.

또한 확률강우강도식을 이용하여 강우강도를 결정할 때 필요한 것이 강우지속기간의 결정이다.

합리식에서는 강우지속기간을 유역의 최원점에서 출구까지 물이 유하하는 시간인 도달시간 혹은 집중시간으로 정의하고 있다. 여기서 도달시간은 유역내의 유로에 색소를 주입하여 실측할 수도 있으나 대부분의 경우 유역의 지형인자와 도달시간간의 경험공식을 사용하여 산정하는 것이 보통이다.

하지만 이같은 경험공식들을 사용하여 유역의 도달시간을 산정하여 보면 공식별로 상당한 차이를 나타내고 있는데, 합리식이 강우지속기간과는 무관하게 독립적으로 유출계수를 결정하고 있다고 한다면 강우지속기간으로 사용하기 위한 도달공식의 선정에 따라 추정하고자 하는 홍수량의 변화가 크게 나타낼 것이다. 그만큼 합리식에서의 강우지속기간 결정이 중요함을 나타낸다고 하겠다.

한편, 합리식에서의 강우강도는 강우량을 확률 분석한 확률강우량을 설계강우로 나타낸 것이기 때문에 평균적인 의미가 포함되어 있다고 하겠다.

따라서 합리식에서의 유출계수는 평균강우강도를 침투홍수량으로 바꾸기 위한 수단으로 볼 수 있기 때문에 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며 유역의 형상, 식생피복 등을 고려하여 결정하게 된다.

$$Q_{max} = FCAI_{mean} \quad (4)$$

## 2.2 확률론적 합리식의 해석

설계상황에서 강우로부터 홍수량을 추정할 경우 강우로부터 초래되는 홍수의 빈도와 실제 홍수량 자료를 이용하여 얻어진 홍수빈도가 같다는 가정은 강우량으로부터 초래되는 홍수량이 조건에 관계없이 항상 동일하다는 뜻이거나 강우로부터 추정된 홍수량이 실제 홍수량의 빈도와 같도록 강우-유출 관계를 조정하거나 아니면 다른 어떤 수단을 강구해야 한다는 말과 같다. 그러나 사실상 같은 강우량이라도 초기손실, 저류량, 침투율 등에 의해 홍수량이 변화하는 등으로 인해 강우와 홍수량의 무조건적인 선형관계는 확률론적으로 증명할 수 없다. 또한 확률론적으로도 확률강우량의 성격을 홍수의 관점에서 분명히 정의할 수 없기 때문에 그 선형성을 증명할 수 없다. 따라서 설계상황에서 강우로부터 홍수량을 추정하는 대부분의 방법들은 이 가정을 만족하기 위해 일반적인 강우-유출의 절차가 아닌, 침투율이든 초기손실이든 강우-유출의 일부분을 확률론적으로 설명해야 할 것이다.

즉, 합리식은 주로 설계상황에서 이용하고, 유출계수라는 매개변수를 통하여 확률강우량을 홍수량으로 전환하는 수단으로 설명하고 있기 때문에 확률론적인 관점이 아닌 확률론적인 관점에서 파악

해야 할 것이다. 다시 말하면 유출계수는 상기 가정을 만족하는 일종의 통계적인 매개변수로 보거나 강우량을 홍수량으로 전환하기 위한 관계용 변수로 보아야 할 것이다.

이는 합리식의 기본 가정에서 그 이유를 찾아볼 수 있다. 즉 합리식에 포함된 강우강도는 확률론적인 측면의 평균강우강도이지 특정한 실제 호우사상에서의 평균강우강도가 아니라는 사실은 합리식 자체가 확정론적으로 설명할 수 있는 것이 아니라 확률론적으로 설명할 수 있는 일종의 통계적인 모형임을 증명한다고 할 것이다.

따라서, 합리식의 확률론적인 해석은 확정론적 관점에서 합리식의 모순을 확률론적으로 재해석하여 설계상황에 알맞게 수정하기 위한 것으로 식(4)를 설계상황에 적용하여 식(5)와 같은 형태로 다시 표시할 수 있다.

$$Q_{\max, t} = FCAI_{mean, t} \quad (5)$$

여기서  $I_{mean, t}$ 는 어느 특정 지속시간과 재현기간  $t$ 에 해당하는 확률강우량으로부터 얻어진 평균 강우강도이며,  $Q_{\max, t}$ 는 재현기간  $t$ 에 해당하는 첨두유량이다.

식(5)의 의미는 어느 특정호우로부터 홍수량을 추정하는 것이 아닌 재현기간  $t$ 에 해당하는 첨두유량을 추정하기 위해 해당 재현기간의 평균강우강도를 이용한다는 것이다. 만약 좌우항을 같은 단위로 설명하기 위해  $Q$ 를  $FA$ 로 나누어 단위를 mm/hr로 통일한다면 다음과 같이 될 것이다.

$$q_{\max, t} = CI_{mean, t} \quad (6)$$

식(6)을 살펴보면 유출계수  $C$ 는 통계량  $q$ 와  $I$ 를 연결하는 매개변수일 뿐이며, 관측자료로부터 빈도 분석을 통해 유도된 특정재현기간의 강우강도를 이용하여 같은 재현기간의 첨두유량으로 전환하는 계수가 된다. 즉, 유출계수는 실제로 설계상황에서만이 사용될 수 있다는 것을 나타내는 것이라고 할 수 있다. 따라서 만약 홍수자료와 강우량자료를 이용하여 빈도분석이 이루어진다면 설계상황에 알맞은 유출계수를 추정할 수 있을 것이고, 그 때 유출계수가 재현기간별로 일정하다면 상수가 될 수 있으며, 일관된 성향을 보인다면 다음과 같은 관계로 추정될 수 있을 것이다.

$$C_t = q_{\max, t} / I_{mean, t} \quad (7)$$

여기서  $C_t$ 는 재현기간에 따른 유출계수이다.

주의할 것은  $q$ 와  $I$ 는 홍수량자료와 강우량자료를 이용하여 독립적으로 빈도분석하여 얻어진 특

정재현기간의 값이라는 사실이다. 다시 말하면 특정한 빈도를 가진 호우사상에 대한 강우량으로부터 초래되는 홍수량을 추정하는 것이 아닌 특정한 재현기간을 갖는 홍수량을 추정하기 위하여 그 재현기간의 강우량을 이용하는 수단인 것이다. 따라서 만약 유출계수가 재현기간에 따라 변화한다면 유출계수는 재현기간의 함수로 표현될 수 있다.

한편, 확정론적 관점에서 합리식의 강우지속기간은 집중시간으로 유출계수와 독립되어 연구되었지만 확률론적 합리식에서는 유출계수와 강우지속기간이 무관하지 않으며 서로간의 종속적 성질을 가지고 있다고 할 수 있다. 즉 강우지속기간이 평균강우강도를 결정하는 종속변수이고, 강우지속기간의 결정은 전통적인 합리식과 같이 매우 중요한 인자이나 반드시 집중시간일 필요는 없게 되며, 그 이유는 합리식을 확률론적으로 해석하였기 때문이다.

따라서 확률론적 합리식에서는 유역반응시간 중 어떠한 시간을 강우지속기간으로 결정하여도 관계 없으며, 다만 개발시의 강우지속기간과 유출계수를 적용시에도 같게 사용해야 한다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 합리식이 지역빈도공식과 유사하기 때문에 강우지속기간을 결정하기 위해서는 가능한 한 유역별로 일관된 값을 제공하는 유역반응시간의 선별이 필요하다고 하겠다.

### 3. 유역의 선정 및 자료수집

본 연구에서 제안된 확률론적인 합리식을 적용하고, 그에 따른 유출계수를 검토하기 위해서는 가능한 한 유역면적은 작아야 하며, 유역면적 내 확률 강우량을 산정하기 위한 시간우량자료와 확률첨두홍수량을 산정하기 위한 첨두유량자료가 있어야 한다.

확률론적인 합리식에서 유출계수는 강우량과 홍수량의 빈도분석으로부터 유도되기 때문에 우량자료와 첨두홍수량자료는 상당히 중요하다. 또한 확률강우량으로부터 유도되는 유출계수가 지역별로 일관된 값을 가지기 위해서는 강우량의 공간적인 변화상태가 상대적으로 작아야 하기 때문에 대상 유역을 소유역으로 제한하여야 한다.

이상의 조건을 만족하는 유역으로 국제수문개발 계획(IHP)의 일환으로 운영하고 있는 대표유역 중 평장강 유역을 합리식의 검토 대상유역으로 선정하였다.

우량관측소는 모두 건설교통부에서 관할하고 있는 자기우량관측소이다.

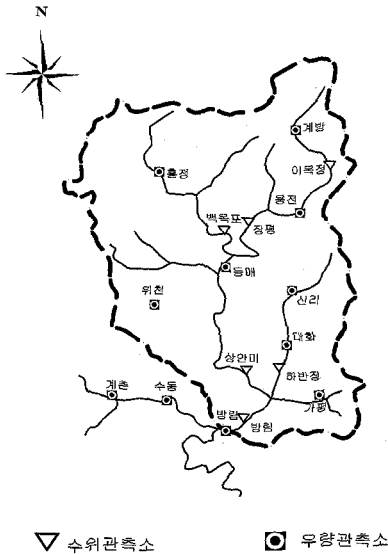


그림 1. 평창강유역의 유역도

본 연구를 수행하기 위해 유역 내 수위관측소 6개 지점(방림, 하반정, 상안미, 백옥포, 장평, 이목정)과 우량관측소 11개 지점(방림, 가평, 수동, 계춘, 대화, 신리, 유천, 등매, 용진, 계방, 흥정)을 선정하였다.

유역을 수위관측소별로 6개의 소유역으로 구분할 수 있고, 각 소유역의 지형적 특성을 유역면적, 유로연장, 하천경사 등으로 나누어 표 1에 나타내었다. 제안된 유출곡선번호는 AMC-II 조건에서의 CN값[3]을 나타낸 것이다.

표 2. 평창강유역의 수위관측소 현황

관측소명	유역면적 (km <sup>2</sup> )	유로연장 (km)	유로중심장 (km)	유로경사	유출곡선번호
방림	519.69	51.85	28.20	0.00745	66.4
하반정	83.98	19.30	7.25	0.01315	65.0
상안미	396.25	44.20	26.50	0.00810	66.7
백옥포	142.26	22.95	11.25	0.01159	68.5
장평	103.55	25.95	15.60	0.01248	65.8
이목정	55.93	16.55	7.20	0.02037	70.0

### 3.1 유량자료의 수집

본 연구를 수행하기 위해서는 침투유량자료와 지속기간별 최대우량자료가 최소한 자료년한 10년 이상이 필요하다. 확률론적 합리식이 홍수량의 빈도분석과 강우량의 빈도분석을 독립적으로 수행한 후 재현기간별 홍수량과 평균강우강도를 이용하여 유출계수를 추정하기 때문에 자료의 년한과 정확도는 홍수량과 강우량의 빈도분석에 직접적인 영향을 주며, 각 빈도분석의 결과는 합리식의 유출계수 추정치를 결정하는 중요한 변수가 되기 때문에 매우 중요하다고 할 수 있다.

유량자료를 얻기 위해서 수위자료는 시간수위와 일평균수위로 나눌 수 있으나 홍수빈도분석을 위해서는 최대수위를 사용해야 한다는 점을 고려하면 시간수위가 적절하다. 따라서 대상유역의 수위자료는 1982년부터 2001년까지 약 20년간의 자료를 시간수위(침투수위) 위주로 수집하였으며, 시간수위 자료의 수집이 어려운 경우 일평균 수위자료를 수집하였다.

시간수위에는 IHP연구에서 제시한 수위자료와 한국건설기술연구원에서 자기수위지를 수집하여 제시한(HISS) 자기수위자료가 있고, 시간수위 입수가 어려운 경우 수문조사년보에서 제시하고 있는 일평균수위와 각 소유역의 수위월보에서 제시하고 있는 수위자료를 수집하였다.

유량자료를 이용해서 홍수빈도분석을 하기 위해 선택한 모형은 연최대계열모형으로 위에서 수집한 수위자료 중 년 최대수위자료를 선별하고 IHP보고서상에 수록된 수위-유량환산곡선식을 이용하여 년 최대유량으로 환산하였다.

각 소유역별 연 최대홍수계열은 표 2와 같다.

### 3.2 강우량자료의 수집

강우자료는 시간 강우량과 일 강우량 등이 있으나 강우빈도분석을 위해서는 시간우량이 적합하다고 할 수 있다.

따라서 대상유역의 11개 우량관측소로부터 IHP 연구에서 제시하고 있는 시간우량자료와 HISS에 입력되어 있는 시간우량자료를 모두 수집하였다.

시간우량자료는 본 연구를 수행하기 위한 홍수량과 강우량의 빈도분석 시 일관성을 유지하기 위해 우량자료와 년한이 같은 1982년부터 2001년까지 약 20년간의 자료를 수집하였으며, 이렇게 수집한 강우사상에 따른 시간우량자료를 지속시간 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20시간으로 나누어 각 지속기간별 강우량을 산정하였으며, 강우자료를 이용한 빈도분석 시 유량자료를 이용한 빈도분석과 같이 년 최대우량계열을 이용하기 위해 년도별로 위

서 산정한 지속기간에 따른 강우량 중에서 년 최대우량을 선정하여 년도별 지속기간에 따른 최대우량자료를 정리하였다.

표 3. 소유역별 연최대홍수계열

단위 : CMS

년 도	방 립		하 반 정		상 안 미	
	월 일	홍수 량	월 일	홍수 량	월 일	홍수 량
82	8. 15	311.3	5. 13	102.9	8. 15	255.7
83	7. 4	265.3	7. 30	95.6	7. 25	242.3
84	9. 2	3423.8	9. 2	810.6	9. 2	2913.1
85	7. 10	474.5	8. 17	53.9	7. 10	411.4
86	7. 19	1788.4	7. 19	177.5	7. 19	974.2
87	7. 22	1564.2	7. 22	293.5	7. 22	1380.0
88	7. 20	713.9	7. 13	67.4	7. 20	634.4
89	7. 25	1217.9	7. 27	247.9	7. 25	992.9
90	9. 11	2915.4	9. 11	483.9	9. 11	2532.4
91	7. 26	672.8	7. 26	139.7	7. 26	588.2
92	8. 27	589.7	8. 27	157.1	8. 27	638.2
93	7. 13	1059.2	7. 13	156.4	7. 13	863.2
94	7. 1	699.3	7. 1	161.0	7. 1	649.6
95	8. 25	2022.4	8. 25	268.9	8. 25	603.4
96	7. 27	602.7	7. 27	17.9	7. 27	1043.4
97	7. 1	709.7	8. 4	186.6	7. 1	763.7
98	8. 8	1027.2	8. 8	266.2	8. 8	1174.0
99	8. 3	717.5	8. 3	87.4	8. 3	671.7
00	8. 25	-	8. 25	-	8. 25	365.9
01	7. 23	-	7. 23	347.9	7. 23	1582.9

표 2. 소유역별 연최대홍수계열(계속)

단위 : CMS

년 도	백 옥 포		장 평		이 목 정	
	월 일	홍수 량	월 일	홍수 량	월 일	홍수 량
82	8. 15	151.9	5. 14	190.4	8. 15	64.9
83	7. 25	162.9	7. 25	187.3	7. 25	48.6
84	9. 2	309.6	9. 2	753.3	9. 2	508.3
85	7. 10	190.8	7. 10	122.2	7. 10	133.0
86	7. 19	504.5	7. 19	264.1	7. 19	174.6
87	7. 22	567.4	7. 22	391.7	7. 22	193.8
88	7. 20	333.1	7. 20	170.1	7. 20	97.2
89	7. 25	479.0	7. 25	240.9	7. 25	172.7
90	9. 11	951.1	9. 11	734.0	9. 11	388.6
91	7. 25	380.0	7. 20	95.2	7. 25	130.0
92	8. 27	281.2	8. 27	-	8. 27	133.1
93	7. 13	435.4	7. 13	-	7. 17	31.5
94	7. 1	304.3	7. 1	70.1	7. 1	114.5
95	8. 9	221.3	8. 25	278.0	8. 25	223.9
96	7. 27	150.6	7. 27	185.1	7. 27	131.2
97	7. 1	-	8. 4	-	7. 1	-
98	8. 8	345.2	8. 8	284.6	8. 8	146.1
99	8. 3	135.8	8. 3	160.5	8. 3	129.4
00	8. 25	173.7	8. 7	199.2	8. 25	155.7
01	7. 23	645.4	7. 23	554.5	7. 23	-

#### 4. 매개변수 추정

합리식을 확률론적으로 해석하여 확률강우량을 홍수량으로 전환시켜주는 매개변수인 유출계수를 추정하기 위해 합리식의 다른 매개변수인 홍수량과 강우량을 확률 분석하여 재현기간 별 확률강우량과 홍수량을 구한 다음 평균확률강우강도를 구하기 위한 지속기간을 결정하였다.

##### 4.1 홍수빈도분석

본 연구에서는 IHP유역을 대상으로 홍수빈도분석을 하기 위해 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 연최대계열모형을 선택하였고, 확률분포는 연최대홍수량계열 혹은 연최대강우량계열의 빈도분석에 많이 사용되는 Gumbel분포로 결정하였다. 또한 Gumbel분포를 이용한 매개변수 추정시 Hosking[4]의 L-moment 법을 이용하였으며, 빈도분석은 L-moment이론을 Program화 한 Hosking[5]의 'Fortran Routine for Use with the Method of L-moment'를 이용하였다.

재현기간은 2, 5, 10, 20, 50으로 선정하여 분석하였지만 자료년한이 20년정도이기 때문에 재현기간 20년 이후의 추정치에 관해서는 사실상 신뢰도를 부여하기는 힘들다고 할 수 있다.

따라서 본 연구의 합리식에서 유출계수를 검토하기 위한 재현기간은 2, 5, 10, 20년으로 볼 수 있다.

평창강 유역내의 IHP유역에 대한 홍수빈도분석 결과는 표 3과 같다.

표 3. 소유역별 재현기간에 따른 홍수량  
(단위 : CMS)

관측 소명	재 현 기 간 (년)				
	2	5	10	20	50
방 립	1025.08	1719.52	2179.30	2620.33	3191.19
하 반 정	192.70	323.24	409.67	492.57	599.88
상 안 미	856.20	1436.23	1820.26	2188.63	2665.45
백 옥 포	314.27	527.18	668.14	803.35	978.37
장 평	255.01	427.77	542.15	651.87	793.89
이 목 정	146.90	246.41	312.29	375.49	457.30

표 3의 결과는 지역빈도분석의 결과이다.

이는 점 빈도분석에 의해서는 짧은 자료년한으로는 재현기간에 따른 추정치의 신뢰도를 부여하기가 힘들고, 또한 평창강 유역의 경우 각 소유역에 대해 유역간의 등질성(기상학적, 지형학적)이 있다고 보아도 무리가 없다고 판단하였기 때문이다.

이렇게 지역빈도분석으로 추정된 각 소유역의 재현기간별 홍수량이 어느정도 일관성이 있는지를 판단하기 위해 재현기간별 홍수량을 유역면적으로 나눈 비유량을 유역면적과 비교하여 그림 2에 나타내었다.

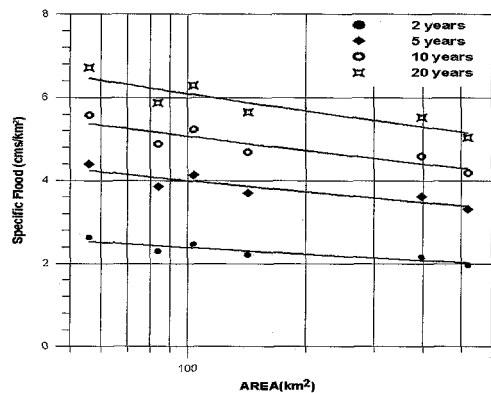


그림 2. 평창강 유역의 비유량

그림 2에서 평창강유역에 대한 재현기간에 따른 비유량은 각 소유역별로 약간씩의 차이를 보임을 알 수 있는데 이는 유역특성의 차이를 들 수도 있지만, 자료수집시 수위자료의 불확실성과 수위를 유량으로 환산하는데 이용한 IHP유역의 수위유량 환산곡선의 문제라고도 볼 수 있다고 하겠다.

하지만 이러한 여러 가지 문제점들을 감안한다면 그림 2에서 보여진 비유량은 유역별로 일관된 성향을 가진다고 할 수 있을 것이다.

##### 4.2 강우빈도분석

확률론적인 합리식에서 확률강우량은 유출계수를 정의하기 위한 하나의 독립된 매개변수로서 매우 중요하다.

본 연구에서는 확률강우량을 산정하기 위해서 대상강우사상을 통계학적 독립성의 가정을 유지할 수 있도록 분리시킨 다음 각 지속기간에 대한 최대평균강우강도 또는 최대강우깊이를 산정하였다.

지속기간은 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20시간으로 분류하였고, 강우계열은 연최대계열로 하기 위해 지속기간에 따른 년 최대강우량을 선별하였다.

이는 본 연구에서 채택하고 있는 합리식이 확률론적이 아닌 확률론적인 관점인 즉 강우빈도와 홍

수빈도의 관계매개변수로 유출계수를 설명하고 있기 때문에 홍수빈도분석과 강우빈도분석을 동일시하기 위한 것이다.

따라서 지속기간별 연최대강우량을 이용한 빈도분석시 확률분포형도 홍수빈도 분석시와 같은 Gumbel분포를 이용하여 L-moment 법으로 매개변수를 추정하여 각 우량관측소별로 지속기간별 재현기간별 확률강우량을 산정하였으며, 재현기간은 홍수량의 경우와 마찬가지로 2, 5, 10, 20, 50년으로 하였다.

이렇게 산정한 대상유역의 11개 관측소의 확률강우량을 6개 소유역의 점확률강우량으로 나타내기 위해서 티센다각형법을 이용하였으며, 소유역별 티센계수는[6] 표 4와 같다.

표 4. 소유역별 티센계수

관측소	소유역	방법	하반정	상안미	백옥포	장평	이목정
방림	0.0230	-	0.0073	-	-	-	-
가평	0.0680	0.0526	-	-	-	-	-
수동	0.0265	-	0.0352	-	-	-	-
계촌	0.0069	-	-	-	-	-	-
대화	0.0887	0.3962	0.0239	-	-	-	-
신리	0.0873	0.4956	0.0110	-	-	-	-
유천	0.1002	-	0.1343	-	-	-	-
등매	0.1127	0.0079	0.1492	0.0648	-	-	-
용전	0.1307	0.0477	0.1648	0.1128	0.4142	0.0960	-
계방	0.1472	-	0.1973	0.1156	0.5858	0.9040	-
홍정	0.2088	-	0.2770	0.7068	-	-	-

그러나, 앞에서 산정한 재현기간별 지속기간에 따른 유역별 점확률강우량은 특정지속기간에 대한 강우량이기 때문에 임의의 지속기간 즉, 평균확률강우강도를 구하기 위한 강우지속기간에 대한 확률강우량을 산정할 수 없다.

따라서 강우지속기간에 대한 확률강우강도를 산정하기 위해 유역별 확률강우량을 이용하여 확률강우강도식을 유도하여야 한다.

본 연구에서는 확률강우강도식 중 Talbot형,

Sherman형, Japanese형의 세가지 형태를 가지고 분석하여 보았고, 그 중에서 Sherman형의 식이 각 소유역에 잘맞는 것으로 판단되어 Sherman식의 형태로 유역별 확률강우강도식을 나타내었다.

또한 합리식을 이루는 기본 가정 중의 하나가 강우지속기간이 유역의 집중시간과 같다는 가정이고 집중시간은 유역의 최원점에서 출구까지 물이 유하하는 시간으로 정의된다. 이런 합리식의 기본 가정은 확정론적인 관점에서 볼 때 유수의 전이를 고려한 것으로 물리적인 의미가 내포되어 있다고 볼 수 있다. 즉 합리식에서 유출계수를 결정하면 유역의 집중시간과 확률강우량은 그 유역의 고유특성이기 때문에 재현기간에 따른 홍수량을 추정할 경우 집중시간의 결정은 유출계수와 관계없이 독립적으로 이루어져야 한다는 것이다.

그러나 본 연구의 확률론적 합리식에서는 유출계수와 강우지속기간은 서로 종속적인 관계를 가지고 있기 때문에 강우지속기간을 유역의 유출특성을 나타내는 유역반응시간의 함수로 간주하고자 하였다.

김남원[7]은 IHP유역(평창강, 위천, 보청천)을 대상으로 가장 일관된 유출계수를 유도할 수 있는 강우지속기간을 위한 공식으로 지체시간과 집중시간을 중심으로 검토해 본 결과 전국 5대강 유역에 대한 침투발생시간 또는 지체시간과 유역면적을 회귀분석하여 제시한 식(8)을 가장 적절한 강우지속기간을 위한 공식으로 선정하였다.

$$t_r = 0.76A^{0.38} \quad (8)$$

따라서 본 연구에서도 강우지속기간을 위한 공식으로 식(8)을 선정하였으며, 식(8)을 이용하여 구한 각 소유역별 집중시간을 표 5에 나타내었다.

표 5. 소유역별 집중시간

유역	소유역	유역면적(km <sup>2</sup> )	$t_r = 0.76A$
평창강	방림	519.69	8.18
	하반정	83.98	4.09
	상안미	396.25	7.38
	백옥포	142.26	5.00
	장평	103.55	4.43
	이목정	55.93	3.51



5. 유출계수 분석

5.1 유출계수의 산정

앞절에서 분석한 자료를 바탕으로 평균강우강도(mm/hr)를 구하고 여기에 유역면적을 곱하여 단위를 m<sup>3</sup>/sec로 환산한 다음 침투유량에 대하여 나누어 유출계수를 산정하였고 각 소유역별 유출계수를 정리하여 표 6에 나타내었다.

표 6. 소유역별 유출계수( $t_r = 0.76A^{0.38}$ )

유역명	소유역	재현기간(년)				
		2	5	10	20	50
평창강	방 립	0.670	0.812	0.871	0.912	0.951
	하반정	0.603	0.723	0.770	0.803	0.834
	상안미	0.674	0.821	0.881	0.923	0.963
	백옥포	0.560	0.687	0.739	0.777	0.813
	장 평	0.601	0.756	0.823	0.871	0.918
	이목정	0.576	0.750	0.829	0.886	0.944

5.2 지표유출계수 결정

일반적으로 지역빈도분석시 지표(index)로 침투 유량계열의 평균을 사용하거나 또는 Extreme Type I 분포의 경우는 2.33년을 사용하는 것이 일반적이며, 또한 지역빈도 경험식을 분석할 경우도 평균 또는 2.33년을 중심으로 하여 제시되고 나머지 재현기간은 지표홍수의 일정한 비율로 표시되는 것이 일반적이다.

한편 김지호, 박영진, 최인호 그리고 송재우[8]에 의하면 미국토목학회에서는 학회에서 제시한 유출계수 범위를 재현기간 2년-10년을 가진 홍수량 추정시에 사용하도록 권장하고 있고 재현기간이 커지면 더 큰 유출계수 값으로 조정해야 한다. 따라서 국내에서도 이 기준을 적용한다면 재현기간이 증가할수록 유출계수도 증가된 값을 사용해야 할 것이고 이는 본 합리식을 확률론적으로 해석했을 경우 분석한 유출계수를 통해서도 재현기간별로 유출계수가 증가하는 것이 증명되었음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 추정된 재현기간별 유출계수 중 10년 빈도 유출계수를 지표유출계수로 하여 타재현기간의 유출계수와 비교함으로써 재현기간이 증가할수록 유출계수가 어떻게 변화하는가를 알아보았으며, 그 결과를 표 7에 나타내었다.

표 7. 평창강유역의 평균유출계수와 Ct/C10

평창강	재현기간(년)	2	5	10	20	50
	평균유출계수(C)	0.61	0.76	0.82	0.86	0.90
Ct/C10	0.75	0.93	1.00	1.05	1.10	

표 7을 보면 재현기간이 증가할수록 평균유출계수의 값은 점점 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 결과는 기존의 합리식이 재현기간에 관계없이 일정하게 유출계수를 정의하는 것이 모순임을 나타낸다고 하겠다.

또한 지표유출계수 10년을 기준으로 보면 재현기간이 2년, 5년에서의 유출계수는 지표유출계수보다 25%, 7% 감소하고, 재현기간 20년, 50년에서의 유출계수는 지표유출계수보다 5%, 10% 증가하는 것을 볼 수 있으며, 설계상황에서 본 연구에서 제시한 지표유출계수와 Ct/C10을 이용하여 미계측 유역의 홍수량을 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

5.3 연구결과의 적용

본 연구에서 제시한 지표유출계수와 Ct/C10의 관계를 이용해 재현기간에 따른 미계측 유역의 홍수량을 추정할 경우, 추정된 홍수량이 어느 정도의 신뢰성을 가지는지 파악하는 것이 중요하다고 할 것이다.

따라서 본 연구의 대상유역인 평창강 유역의 6개 소유역에 대한 홍수량자료를 빈도분석함으로써 얻은 재현기간별 홍수량과 본 연구에서 제시한 지표유출계수와 Ct/C10의 관계를 이용, 합리식으로 추정된 재현기간별 홍수량 자료를 비교하여 재현기간별로 표준계산오차(RMSE)를 산정하였다.

표 8에서 재현기간별 확률홍수량은 평창강유역의 홍수량 참값이라고 할 수 있으며, 추정홍수량은 본 연구에서 제시한 유출계수를 이용하여 합리식에 의해 추정된 홍수량이다.

본 연구에서 제시한 유출계수를 이용할 경우 홍수량 추정오차는 10%이내이며 이를 평창강 유역을 포함한 한강유역의 미계측 유역의 홍수량 추정시 신뢰성 있는 지표로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

표 8. 평창강유역의 홍수량 추정치 표준개산오차

관측 소명	홍수량 (m <sup>3</sup> /sec)	재현기간(년)				
		2	5	10	20	50
방림	확률 홍수량	1025.1	1719.5	2179.3	2620.3	3191.2
	추정 홍수량	941.15	1615.1	2051.6	2474.9	3026.4
하반정	확률 홍수량	192.70	323.24	409.67	492.57	599.88
	추정 홍수량	196.56	340.70	436.36	528.28	599.88
상안미	확률 홍수량	856.20	1436.2	1820.3	2188.6	2665.5
	추정 홍수량	781.24	1333.9	1694.3	2042.5	2497.2
백옥포	확률 홍수량	314.27	527.18	668.14	803.35	978.37
	추정 홍수량	345.13	585.28	741.13	890.48	1085.1
장평	확률 홍수량	255.01	427.77	542.15	651.87	793.89
	추정 홍수량	261.12	431.72	540.17	644.70	779.71
이목정	확률 홍수량	146.90	246.41	312.29	375.49	457.30
	추정 홍수량	156.81	250.60	309.09	364.81	437.12
표준개산오차 (RMSE)		47.90	64.66	79.84	92.70	107.91

6. 결론

본 연구에서는 첨두홍수량 추정방법 중 하나인 합리식을 기존의 확정론적인 관점에서 벗어나 확률론적인 관점에서 재해석하여, 합리식의 유출계수를 확률강우량을 홍수량으로 전환하여 주는 통계적인 매개변수로 인식하고, 이 매개변수를 한강유역의 미계측 지점에 적용하기 위하여 평창강 유역을 대상으로 분석함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 합리식을 기존의 확정론적인 관점에서 해석할 경우 초기손실, 저류량, 침투율 등 강우손실부분을 단순히 유출계수로 설명하기에는 매우 불확실한 모형이라고 할 수 있다.
- (2) 합리식을 확률론적으로 해석할 경우, 유출계수를 확률강우량을 홍수량으로 전환시켜주는 통계적인 매개변수로 인식하여 설계상황에 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

(3) 확률론적 합리식의 유출계수는 강우량과 홍수량 자료를 빈도분석함으로써 추정할 수 있고, 이때 유출계수는 강우지속기간과 종속적인 관계를 가지게 된다. 따라서 합리식을 확률론적으로 해석하여 분석한 유출계수를 설계에 적용하기 위해서는 분석시 사용한 강우지속기간 공식과 설계에 적용시 사용한 강우지속기간 공식은 반드시 일치하여야 한다.

(4) 본 연구에서 강우지속기간을 위한 공식으로 유역반응시간을 유역면적과 상관시킨  $0.76A^{0.38}$  공식을 선정하였으며, 본 연구에서 산정한 유출계수를 이용하기 위해서는 설계에 적용시 반드시 이 공식을 이용하여야 한다.

(5) 평창강유역을 대상으로 재현기간별 유출계수를 산정한 결과, 재현기간 2, 5, 10, 20, 50년에 해당하는 평균유출계수는 각각 0.61, 0.76, 0.82, 0.86, 0.90으로 나타났다.

(6) 지표유출계수는 지표홍수법과 유사한 관계로 재현기간 10년을 1로 하였고, 지표유출계수에 대한 타재현기간의 비인 Ct/C10를 산정한 결과 재현기간 2, 5, 20, 50년에 대하여 각각 0.75, 0.93, 1.05, 1.10으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 유출계수를 이용할 경우 홍수량 추정오차는 10%이내이며, 이 관계를 평창강 유역을 포함한 한강유역의 홍수량 추정에 신뢰성 있는 지표로 이용할 수 있을 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국수자원학회, "하천설계기준", 건설교통부, 2000
- [2] 윤용남, "공업수문학", 청문각, 1998
- [3] 한국건설기술연구원, "국제수문개발계획(IHP) 대표유역연구조사 보고서", 건설부, 1989
- [4] Hosking, J. R. M, "The Theory of Probability Weighted Moment", IBM Math. Res, RC 12210, Yorktown Heights, New York, PP. 160, 1986
- [5] Hosking, J. R. M. , "Fortran Routines for Use With The Method of L-Moment Version 2", IBM Math. Res. Rep. RC17097, Yorktown Heights, New York, PP. 117, 1991
- [6] 한국건설기술연구원, "국제수문개발계획(IHP) 대표유역연구조사 보고서", 건설부, 1983
- [7] 김남원, "미계측 유역의 홍수유출 특성에 관한 비교연구 -합리식을 중심으로-", 건기연 94-WR-112, 한국건설기술연구원, 1994
- [8] 김지호, 박영진, 최인호, 송재우, "재현기간별 유출계수를 고려한 유출량 해석", 대한토목학회 논문집 pp. 34~37, 2002