

# 첨두홍수량 산정을 위한 수정합리식의 적용

## Application of the Modified Rational Formula for the Estimation of Peak Flood Discharge

박 교\* / 이충성\*\* / 김형수\*\*\* / 심명필\*\*\*\*

Park, Kyo / Yi, Choong Sung / Kim, Hung Soo / Shim, Myung Pil

### 요 지

합리식(rational formula)은 일정한 강우강도를 갖는 호우로 인한 소유역의 첨두홍수량을 결정할 때 대표적으로 사용되고 있다. 기존의 합리식 틀 안에서 유역의 기하학적인 형상이 타원의 형태와 비슷하다면 유역의 형상을 고려한 수정된 합리식으로 첨두홍수량을 결정할 수 있다. 수정된 합리식에서는 강우가 전체 지속시간 동안 유역에 균등하게 분포한다는 기존의 합리식의 가정과는 달리 강우가 유효우량주상도의 각 시간간격에 균등하게 분포한다고 가정한다. 이러한 가정은 강우 지속시간이 도달시간 보다 작은 경우에도 합리식을 적용할 수 있음을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 유역의 기하학적인 형상이 타원형에 가까운 예측천 유역에 합리식과 수정합리식을 적용 한 후 그 결과를 비교·분석하였다. 그 결과 수정합리식에 의한 첨두유량이 합리식보다 상당히 적게 산정되었다. 이는 합리식이 식생이 발달한 투수유역에서 첨두유량을 과다 산정한다는 기존 연구결과와 일치하는 것이다. 따라서 수정합리식은 합리식 가정의 한계를 보완하면서 비교적 단순한 프로세스를 유지하고 있어 조건이 부합되는 소유역에서 유용할 것으로 판단되었다.

**핵심용어 : 합리식, 수정합리식, 도달시간, 유역형상, 유효우량**

### 1. 서 론

19세기 중반부터 사용되기 시작한 합리식은 식 자체의 단순함으로 인해 가용 강우자료의 부족 시에도 강우 유출 관계를 비교적 쉽게 분석할 수 있어 아직까지도 광범위하게 사용되고 있다. 합리식은 강우, 침투 또는 손실이 전체 강우지속기간동안 시간과 공간에 균등하게 분포한다는 가정을 전제로 첨두홍수량을 산정하고 있다. 이에 반해 Hua 등(2003)이 제시한 수정합리식은 손실을 제외한 유효우량이 오직 유효우량주상도의 시간간격에 균등하게 분포 한다고 가정하여 첨두홍수량을 산정한다.

최근까지 합리식과 관련해서 많은 연구가 진행되었는데 최근에 Chen과 Zhang(1983)이 강우지수와 유역의 물리적인 특성에 의한 계수를 이용해 유출량과 도달시간을 산정하였고 이영대 등(2004)이 합리식의 유출계수와 NRCS의 CN과의 관계를 연구함으로써 유출계수  $C$ 를 토양의 포화도, 토양의 종류와 연관 지어 산출해 내려 하였다. 수정합리식과 관련하여서는 유동훈(1995)이 합리식에 조정계수  $\alpha$ 를 포함한 형태의 변형된 합리식을 제시하였고, Hua 등(2003)은 유역의 기하학적인 형상이 타원이나 마름모 일 때 적용시킬 수 있는 수정합리식을 제시하였다.

본 연구에서는 Hua 등(2003)이 제시한 수정합리식을 유역의 형상이 타원과 유사한 예측천 유역에 적용해 보고 그 결과를 기존의 합리식과 비교·분석 하였다.

\* 정회원.인하대학교 환경토목공학부 석사과정·E-mail : pk4102@naver.com  
\*\* 정회원.인하대학교 환경토목공학부 박사과정·E-mail : sung@inha.ac.kr  
\*\*\* 정회원.인하대학교 환경토목공학부 부교수·E-mail : sookim@inha.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원.인하대학교 환경토목공학부 교수·E-mail : shim@inha.ac.kr

## 2. 수정합리식의 기본 이론

하천설계기준(건설교통부, 2002)에 제시된 합리식에 의한 침투유량 계산은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산된다.

$$Q_{m,p} = \frac{1}{3.6} CIA = 0.2778 CIA \quad (1)$$

여기서,  $Q_{m,p}$ 는 빈도  $p$ 에 대한 침투홍수량이고,  $C$ 는 유출계수,  $I$ 는 강우강도,  $A$ 는 유역면적, 0.278은 단위변환에 따른 계수이다. Pilgrim과 Cordery(1993)는 합리식은 강우지속기간  $D_w$ 이 도달시간  $T_c$ 보다 크거나 같은 경우에만 적용되고  $D_w$ 가  $T_c$ 보다 큰 경우에  $Q$ 는  $t=T_c$ 부터  $D_w$ 까지 일정하고 그때의  $Q$ 는  $Q_{m,p}$ 와 같다고 하였다. 만약  $D_w$ 가  $T_c$ 보다 작은 경우에  $Q_{m,p}$ 는 유역출구가 아닌 유역 내에서 발생하게 되고 이것은 유역의 어느 곳에서 침투홍수량이 나타나는 가를 먼저 알아야하기 때문에 식(1)을 직접적으로 사용할 수가 없게 된다.

Chen과 Zhang(1983)은  $D_w < T_c$ 인 경우에 침투홍수량과 도달시간을 산정하는 식을 다음의 식(2),(3)과 같이 제시하였다.

$$Q_{m,p} = 0.178(nS_p D_w^{1-n} / T_c - \Phi)A \quad (2)$$

$$T_c = 0.278L / (mS^{1/3} Q_{m,p}^{1/4}) \quad (3)$$

여기서,  $\Phi$ (mm/hr)는 손실이나 일정한 침투를 나타내는 계수이고,  $m$ 은 유역의 물리적인 특성과 흐름의 수리학적 성질과 관련된 계수,  $S_p$ (mm)는 한 시간 동안의 설계 강우 깊이,  $n$ 은 강우지수,  $S$ (km/km)는 하도의 평균경사이다. 그러나 식(2)와 (3)은 유역의 기하학적인 형상이 직사각형이라는 가정 하에 만들어진 식으로 소유역의 기하학적인 형상이 타원이나 마름모가 많은 자연유역에 직접적으로 적용하기에는 문제가 있다(Hua등, 2004). 그러므로 타원이나 마름모 형상의 소유역에서 수문곡선과 침투유량을 측정하기 위해서는 수정된 합리식과 그 절차가 필요하다. 수정된 합리식은 강우지속기간이 도달시간보다 작은 경우뿐만 아니라 그 역의 경우에도 모두 사용될 수 있어 기존의 합리식에 비해 그 유용성이 광범위 하다고 할 수 있다.

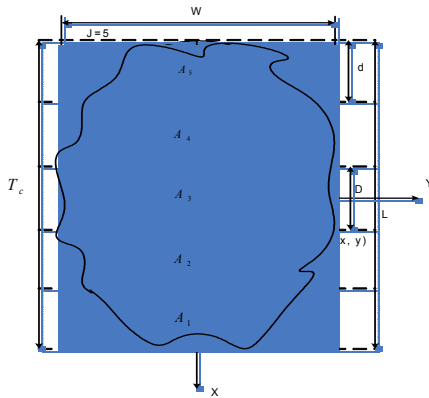


그림 1. 등시간선으로 나눈 타원형 유역 (Hua등, 2004)

Pilgrim과 Cordery(1993)은 일반적으로 유역면적이  $25 \text{ km}^2$ 이 하인 유역을 소유역이라고 하였다. 그림 1은 등시간으로 5등분된 유역을 나타낸다. 타원형 소유역에서  $W$ (km)는 유역의 최대 폭으로 타원의 단축에 해당하고  $L$ (km)과  $T_c$ 는 타원의 장축으로 유역의 최대길이와 도달시간을 의미한다.  $d$ (km)는 두 개의 등시간선 간 거리이다. 거리  $d$ 를 흐르는 유량의 시간은 유효우량도의 시간간격  $D$ 와 같고  $j$ 개의 등시간선으로 나뉜 각 유역의 넓이는  $A_j$ 이고  $A_D$ 는 나누어진 유역 중 가장 큰 면적을 갖는 유역이다. 등시간으로 나누어진 타원형 소유역에서 유효우량도의 시간간격이 도달시간보다 작은 경우( $D < T_c$ )에 침투유량은 다음의 식(4)로 측정된다.

$$Q_{m,p} = 0.278 R_{D,p} A_D / D \quad (4)$$

여기서,  $R_{D,p}$ (mm)는 시간간격  $D$ 에 대한 유효우량이고  $D$ 가  $T_c$ 보다 작은 경우에 최대침투유량은  $A_D$ 에 분포하게 된다. 그림 1에서  $A_D$ 는 다음의 식(5)로 계산된다.

$$A_D = A - 2 \left( \frac{WL}{4} \arccos \frac{x}{L/2} - xy \right) \quad (5)$$

여기서  $(x, y)$ 는  $A_D$ 를 구성하는 좌표점으로서 유역의 출구점과 가까운 곳의 좌표이며 다음의 식(6)과 (7)로 계산된다.

$$x = \frac{L}{2} - \frac{T_c - D}{2} \quad V = \frac{L}{2} \left[ 1 - 0.278 \left( 1 - \frac{D}{T_c} \right) \right] \quad (6)$$

$$y = \frac{W}{2L} \sqrt{L^2 - 4x^2} \quad (7)$$

식 (5),(6),(7)을 식 (4)에 대입한 후 정리하면  $Q_{m,p}$ 는 다음과 같은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{m,p} = 0.278 \frac{R_{D,p}}{D} \left\{ A - \frac{WL}{2} \arccos \left[ 1 - 0.278 \left( 1 - \frac{D}{T_c} \right) \right] + \frac{WL}{2} \left[ 1 - 0.278 \left( 1 - \frac{D}{T_c} \right) \right] \sqrt{1 - \left[ 1 - 0.278 \left( 1 - \frac{D}{T_c} \right) \right]^2} \right\} \quad (8)$$

$R_{D,p}$ 가 계산되어지면 침투유량  $Q_{m,p}$ 와 도달시간  $T_c$ 는 반복법(iteration method)에 의해 계산되어진다.

### 3. 수문곡선의 합성

합리식은 유효우량이 강우지속기간  $D_w$ 동안 공간적으로 균등하고 강우지속기간이 도달시간  $T_c$ 보다 크거나 같다는 가정 하에서만 이용할 수 있다. 그러나 수정합리식에서는 유효우량이 오직 시간간격  $D_i$ 동안 유역에 분포한다고 가정하고 있으므로 이는 지속기간이 도달시간 보다 작은 경우에도 합리식을 적용할 수 있음을 나타내는 것이다. 이러한 가정은 임의의 강우사상을 더 잘 묘사할 수 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 수정합리식으로부터 수문곡선을 작성하는 방법은 다음과 같다(Hua 등, 2004).

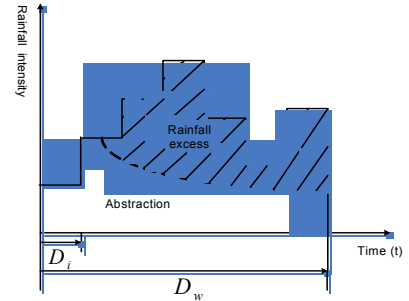


그림 2. NRCS방법의 유효우량주상도 (Chow 등, 1988)

① 그림 2의 유효우량주상도에서 각 시간간격에 따른 유효우량으로부터 반복법을 사용하여  $Q_{m,i}$ 와  $T_{c,i}$ 를 계산한다. 식(8)의  $R_D$ 는 유효우량의 시간간격  $D_i$ 에 따른 유효우량  $R_{D,i}$ 이다.

② 대상 유역을 등시간선으로 나눈다. 나누어지는 유역의 개수  $k$ 는  $T_{c,i}/D_i$ 로 계산된 값과 가까운 홀수의 값이고 인접한 등시간선의 거리  $d=L/k$ 이다. 그림 1은 등시간선으로 나누어진 유역의 예이다.

③ ①에 의해 계산된  $Q_{m,i}$ 는 나누어진 유역의 면적 중 최대 유역 면적인  $A_D$ 에서의 침투유량이고 등시간선에 의해 나누어진 각 유역에서의 침투유량  $Q_j(j=1, \dots, k)$ 는 다음 식(9)에 의해 계산된다.

$$Q_j / Q_{m,i} = A_j / A_D = A_j / A_3 \quad (9)$$

각각의  $A_j$ 가 계산된 후  $Q_j(j=1 \dots k)$ 가 계산된다. 여기서  $Q_0=Q_{k+1}=0$ 이고  $Q_j(j=1, \dots, k)$ 가 계산되면  $Q_j(j=1 \dots k)$ 에 따른 각각의 수문곡선을 작성할 수 있게 된다. 각 수문곡선의 기저시간( $T_{L,i}$ )은  $T_{L,i}=T_{c,i}+D_i$ 이다. 그림 1과 같이  $(j-1)^{th}$ 과  $j^{th}$ 로 나누어진 타원형 소유역에서 좌표  $X_j=L/2-jd$ 이고 나누어진 유역의 면적은 다음의 식(10)과 (11)에 의해 계산된다.

$$A_{arc,j} = \frac{WL}{4} \arccos \frac{2X_j}{L} - \frac{WX_j}{2L} \sqrt{L^2 - 4X_j^2} \quad (10)$$

$$A_j = A_{arc,j} - A_{arc,j-1} \quad j=1, \dots, k \quad (11)$$

④ ①-③의 과정을 반복하여 얻은  $Q_j$ 로 각각의 수문곡선을 작성하고 작성된 수문곡선을 시간축을 따라 중첩하면 총유효우량에 대한 수문곡선을 작성할 수 있고 그에 따른 침투유량 및 도달시간을 산정할 수 있다.

#### 4. 적용 및 결과

본 연구를 수행하기 위한 대상유역은 충북 상주군 모서면의 지방 2급 하천인 예곡천 소유역으로 유역의 기하학적인 형상이 타원형과 유사하여 수정합리식을 적용하기에 적합하다. 유역특성인자를 추출하기 위해서 1:25000 수치지형도에서 추출한 DEM을 이용하면 유역면적  $A=19.562 \text{ km}^2$ , 유로연장  $L=6.579 \text{ km}$ , 하상평균 경사  $S=0.0233$ , 유역의 최대폭  $W=3.783 \text{ km}$  으로 나타났다. 그림 3은 추출된 예곡천 유역이다. 유역의 시간별 평균우량 산정을 위해서 입력강우는 청산과 중늘 강우 관측소의 우량자료를 티센 가중법으로 평균하여 사용 하였다. 관측된 강우는 1999년 6월 23일 07:00부터 23:00까지 17시간의 강우사상으로 평균 강우강도는  $6.46 \text{ mm/hr}$ , 최대강우강도는  $14.46 \text{ mm/hr}$  이다. 계산에 사용될 계수  $m$ 은 유역의 물리적인 특성과 관계된 인자로서 유역의 토지이용별 지배 면적비를 가중인자로 하여 이를 토지이용별 유출계수에 곱하여 합산한 후 전 유역 면적으로 나누어 산정하였고 그 값은 0.65이다.

침투유량과 도달시간 산정을 위해 필요한 유효우량은 NRCS(National Resources Conservation Service) 방법을 이용하였는데 강우가 시작된 후 11시간까지는 모두 손실되어 직접유출량이 발생하지 않았고 11시간 이후부터 직접 유출량이 발생하였다. NRCS 방법으로 산정된 유효우량은 유출물이 보통인 AMC-II 조건하에서 산정되었으며 식(3)과 (8)을 이용하여 계산된 직접 유출량과 도달시간은 표 1과 같다.

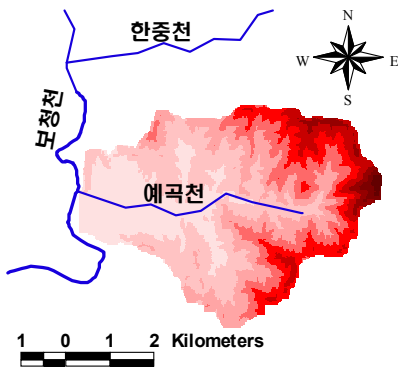


그림 3. 예곡천 소유역

표 1. 관련 공식에 의해 산정된 유효우량, 유출량, 도달시간

유효우량의 시간간격 $D_i=1(\text{hr})$	1	2	3	4	5	6
강우량 $X_p(t) (\text{mm})$	8.852	4.697	9.605	14.464	10.042	1.209
유효우량 $R_{D,p}(t)$	0.070	0.199	0.790	2.081	2.016	0.272
유출량 $Q_{m,i} (\text{m}^3/\text{s})$	0.32	0.93	3.73	9.92	9.61	1.27
도달시간 $T_{c,i} (\text{hr})$	12.66	9.44	6.60	5.15	5.20	8.70
등시간선의 개수 $k$	13	9	7	5	5	9
기저시간 $T_{L,i} (\text{hr})$	13.66	10.44	7.60	6.15	6.20	9.70

표 1에서 계산된 도달시간과 유출량으로 식 (9)와 (11)을 이용하여 각각의 유효우량에 따른 유출량의 수문곡선을 작성하고 작성된 수문곡선들을 중첩하여 최종적으로 전체 유효우량에 대한 수문곡선을 작성하였다. 표 2는 유효우량별로 계산된 도달시간을 등시간으로 나눈 다음 나뉘어진 소유역별로 계산된 침투유량을 나타낸 것이다. 소유역별로 계산된 유출량을 이용하여 작성된 수문곡선은 그림 4와 같다.

수정합리식을 적용한 결과, 그림 4와 같이 도달시간은  $2.437(\text{hrs})$ 이고 침투유량은  $22.31 \text{ m}^3/\text{s}$  로 산정되었다. 기존 합리식으로 산정된 유출량은  $81.06 \text{ m}^3/\text{s}$  로 수정합리식에 의해 계산된 침투유량과는 약  $58 \text{ m}^3/\text{s}$  차이로 매우 큰 차이를 나타내었다.

표 2. 등시간선으로 나누어진 소유역의 침투유량

유효우량의 시간간격 $D_i=1(hr)$	$T_{L,i}(hr)$	등시간선으로 나누어진 소유역의 침투유량 ( $Q_j, j=0...k+1, m^3/s$ )														
		$Q_0$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$	$Q_{10}$	$Q_{11}$	$Q_{12}$	$Q_{13}$	$Q_{14}$
1	13.66	0.00	0.12	0.20	0.25	0.29	0.31	0.32	0.32	0.32	0.31	0.29	0.25	0.20	0.12	0.00
2	10.44	0.00	0.40	0.69	0.83	0.91	0.93	0.91	0.83	0.69	0.40	0.00				
3	7.60	0.00	1.80	3.05	3.57	3.73	3.57	3.05	1.80	0.00						
4	6.15	0.00	5.59	9.07	9.92	9.07	5.59	0.00								
5	6.20	0.00	5.41	8.78	9.61	8.78	5.41	0.00								
6	9.71	0.00	0.55	0.94	1.14	1.24	1.27	1.24	1.14	0.94	0.55	0.00				

일반적으로 도달시간은 유역의 지형인자와 도달시간간의 경험공식을 사용하여 산정하는 것이 보통으로 Kirpich, Rziha, Kerby 공식에 의해 계산된 도달시간은 각각 1.104 hrs, 0.781 hrs, 2.044 hrs로 수정합리식에 의해 계산된 도달시간보다 대체적으로 작게 계산되었다.

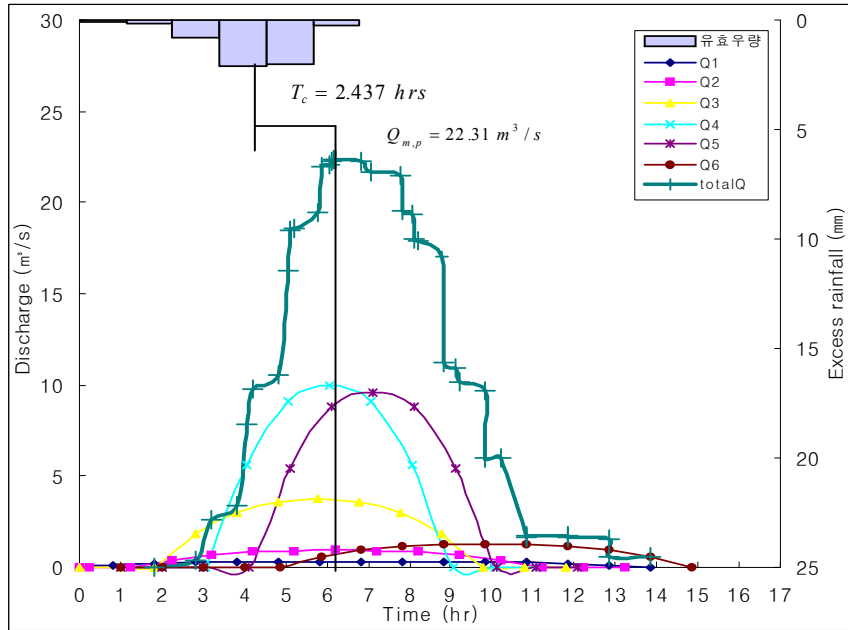


그림 4. 총 유출 수문곡선

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 Hua 등(2003)이 제시한 수정합리식을 예측천 유역에 적용하여 합리식과 비교하였다. 기존의 합리식에서는 강우가 전체 지속기간동안 균등하게 분포한다는 가정 하에 침투유량을 산정하였으나 수정합리식에서는 강우가 오직 유효우량주상도의 시간간격에 분포한다는 가정 하에 유효우량의 변화에 따라 침투유량 및 도달시간을 산정하였다. 적용 결과 수정합리식은 강우의 지속시간이 도달시간보다 작은 경우에도 적용할 수 있을 뿐만 아니라 계산과정의 단순함을 보완하고 있어 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다. 향후에 유출량 자료가 있는 타원형 소유역에 수정합리식을 적용한 후 실 관측치와 비교하면 수정합리식에 의한 침투유량이 얼마나 정확하게 산정되었는지를 판단할 수 있으리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(2002). **하천설계기준**.
2. 유동훈(1995). 유출량 산정을 위한 합리식의 개선, **대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집(II)**, 대한토목학회 pp.123-126
3. 이영대, 김종순, Nirmal Kumar Acharya (2004). **합리식의 유출계수(C)와 SCS식의 CN과의 관계**, 대한토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 754-759.
4. Chen, J. Q. and Zhang, S. G.(1983). An Improved Rational Formula and Its Applications. *Chinese Hydrology 1*, pp. 1-8.
5. Hua J., Liang Z. and Yu Z.(2003). *A Modified Rational Formula for Flood Design in Small Basins*, Journal of the American Water Resources Association, Vol. 39, No.5, pp. 1017-1025.
6. Chow V. T., Maidment D. R. and Mays L. W.(1988), *Applied Hydrology*, pp.147-155.
7. Pilgrim, D. H. and Cordery, I.(1993). *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, Inc., pp. 9.14-9.17.