

# 강우 Coverage의 영향을 고려한 홍수빈도분석

○문장원<sup>1)</sup>, 유철상<sup>2)</sup>, 김중훈<sup>3)</sup>

## 1. 서론

강우는 시공간적으로 매우 큰 변동성을 나타내는 수문현상으로 동일한 양의 강우가 어떤 유역에 발생한다 할지라도 해당 호우사상의 시공간적 특성에 따라 매우 다른 유출특성을 나타낼 수 있다. 강우-유출분석을 위한 입력자료로서 면적평균강우를 이용할 경우 공간적인 변동특성의 정량화는 시간분포특성보다 중요한 의미를 갖는다. 또한 강우는 시간 및 공간적으로 매우 불규칙적으로 발생하는 특성을 갖게 되므로 공간적인 분포특성은 쉽게 정량화 또는 모형화 할 수 없는 매우 복잡한 양상을 나타내게 되며, 특히 유역면적이 큰 경우 이와 같은 공간분포특성이 해당 유역에서의 유출양상에 매우 중요한 영향을 미친다고 알려져 있다(Osborn and Larsen, 1973).

본 연구에서는 Marco와 Valdes(1998)에 의해 제시된 강우 Coverage 개념을 바탕으로 빈도홍수량 산정 시 강우의 공간분포특성이 반영될 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 일반적으로 확률홍수량 산정을 위해 이용되는 방법인 통계적인 홍수빈도분석 방법이나 강우-유출모형을 이용한 방법에서는 이에 대한 고려가 쉽지 않으므로 본 연구에서는 동역학적 홍수빈도모형을 이용하였으며, Marco와 Valdes(1998)에 의해 제시된 강우 Coverage 분석방법을 이용하였다. Marco와 Valdes(1998)는 강우 Coverage 특성을 유역 내 강우발생지역의 분석을 통해 결정할 수 있다고 보았으며, 이를 확률분포로 나타낼 수 있는 방법을 제시하였다. 이들은 연구결과에서 동역학적 홍수빈도분석 방법으로 결정되는 홍수빈도가 강우 Coverage의 영향을 크게 받을 것임을 언급하면서 개략적으로 강우 Coverage의 영향이 포함된 동역학적 홍수빈도분석 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 이들에 의해 제시된 개념을 바탕으로 강우 Coverage의 확률분포를 유도하고, 이를 포함한 새로운 동역학적 홍수빈도분석 모형을 제시하였다.

## 2. 강우 Coverage의 개념 및 확률분포의 유도

Marco와 Valdes(1998)는 유역면적을  $S_c$ , 유역내 강우발생영역을  $S_e$ 라 하고, 이들의 면적비를 Coverage  $c = S_e/S_c$ 라고 하여 이에 대한 확률분포를 유도하였다. 이들은 그림 1에서 보는 바와 같이 유역과 강우영역을 원형으로 단순화하여 유역을 나타내는 원의 반경을  $r_c$ , 강우영역을 나타내는 원의 반경을  $r_s$ 라고 하여 이론적인 확률분포를 유도하였으며, 유역중심과 강우영역 중심간의 거리  $r^*$ 를 기준으로 강우영역은 무작위하게 분포한다고 가정하였다. 이 때 강우영역의 반경  $r_s$ 는 지수함수형태의 확률분포를 갖는 무작위 변수로 가정하였으며, 제시된 확률분포는 유역전역에서 강우가 발생할 경우인 Full Coverage를 의미하는 이산분포와 Partial Coverage를 의미하는 연속분포로 이루어져 있다.

이와 같은 가정 하에 Marco와 Valdes(1998)는 다음 식 (1)과 같이 나타나는 Full Coverage의 이산확률분포식과 식 (2)로 표현되는 Partial Coverage의 연속확률분포식을 제시하였다.

$$P(c = 1) = e^{-\lambda} (1 + 2\lambda) - e^{-2\lambda} (1 + \lambda) E_1(2\lambda) \tag{1}$$

$$f(c) = \frac{\lambda e^{-\lambda c^{1/2}}}{2c^{1/2}} + k_1(\lambda) - k_2(\lambda) c \tag{2}$$

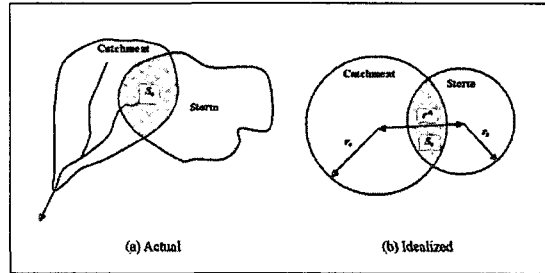


그림 1. 강우 Coverage 관련 개념도

1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원 (E-mail : jwmoon@kict.re.kr)

2) 고려대학교 토목환경공학과 부교수 (E-mail : envchul@korea.ac.kr)

3) 고려대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : jaykim@korea.ac.kr)

여기서,  $x$ 는 유역과 강우영역의 반경비(즉,  $x = r_c/r_s$ )를 나타내는 매개변수로서, Eagleson(1984)과 Foufoula-Georgiou(1989)의 연구에서 제시된 매개변수  $\alpha$ 와 동일한 의미를 갖는다. 또한 식 (2)에서  $k_1(x)$ 와  $k_2(x)$ 는 다음 (3), (4)와 같은 관계식을 의미하며,  $E_1$ 으로 표현된 함수식은 (5)와 같은 관계식으로 나타내어진다.

$$k_1(x) = 4xe^x E_1(2x) \quad (3)$$

$$k_2(x) = 4xe^{-x} - 8x^2 e^x E_1(2x) \quad (4)$$

$$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz \quad (5)$$

식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 강우의 Full 및 Partial Coverage에 대한 확률밀도함수는 모두 무차원 매개변수  $x$ 의 함수로 표현되고 있음을 알 수 있으며, 이 값을 결정하면 강우 Coverage에 대한 확률밀도함수를 결정할 수 있다. 매개변수  $x$ 의 결정은 실제 강우자료를 분석하여 해당 유역에 대한 Coverage의 통계적인 특성값을 산정한 후, 이론식으로부터 유도된 1, 2차모멘트 및 분산에 대한 관계식에 적용하여 동일한 값을 나타내는  $x$ 를 결정함으로써 수행된다.

### 3. 동역학적 홍수빈도분석 모형

동역학적 홍수빈도분석 모형은 강우-유출과정과 홍수빈도 개념을 정립하여 개발된 방법으로 침투유량을 재현기간의 함수로 표현하기 위하여 강우, 침투, 유출응답을 서로 조합한다. 이를 위해 먼저 적절한 강우모형을 이용하여 호우사상의 변수인 평균강우강도와 호우지속기간의 주변확률밀도함수의 형태를 가정하며, 총 우량을 유효우량으로 전환하기 위해 침투과정을 고려하게 된다. 전환된 유효우량의 강우강도와 지속기간의 결합 확률밀도함수가 유도되면 이로부터 직접유출로 전환하기 위해 유출모형을 적용하게 되며, 최종적으로 침투유량에 대한 누가분포함수를 유도할 수 있다. 이상과 같은 절차를 거쳐 누가분포함수가 산정되면 이로부터 해당 침투유량에 대한 재현기간을 산정할 수 있다. 그림 2는 동역학적 홍수빈도모형의 적용절차를 개략적으로 나타낸 그림이다.

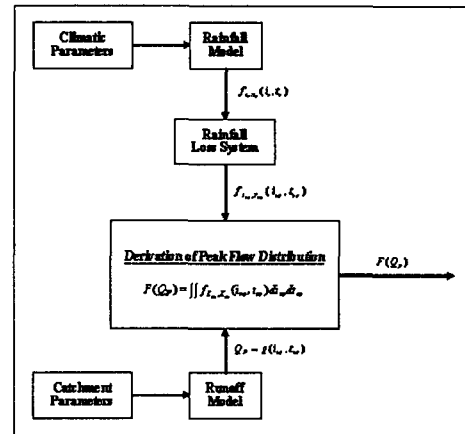


그림 2. 동역학적 홍수빈도모형의 개요

동역학적 홍수빈도분석 모형은 채택한 강우모형, 침투모형 및 유출모형에 따라 여러 가지의 형태로 구분 제시될 수 있다.

Raines와 Valdes(1993)는 Rectangular Pulse 강우모형, SCS 유효우량법과 지형형태기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic IUH, GeIUH)를 적용한 동역학적 홍수빈도분석 모형을 제시하였으며, 본 연구에서는 이를 강우 Coverage 영향이 포함된 모형의 제시를 위해 이용하였다.

### 4. 강우 Coverage를 고려한 동역학적 홍수빈도분석 모형의 유도

Marco와 Valdes(1998)는 강우 Coverage를 동역학적 홍수빈도분석 모형 유도 시 하나의 변수로 도입할 수 있다고 보았으며, 이를 통해 Coverage가 고려된 동역학적 홍수빈도분석 모형의 개략적인 관계식을 다음 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$F(Q_p) = \int \int \int_R f_{I_m, T_m}(i_{re}, t_{re}) f_c(c) di_{re} dt_{re} dc \quad (6)$$

여기서,  $f_{I_m, T_m}(i_{re}, t_{re})$ 는 강우강도  $i_{re}$ 와 강우지속기간  $t_{re}$ 의 결합확률밀도함수이며,  $f_c(c)$ 는 강우 Coverage의 확률밀도함수를 의미한다.

식 (6)에서 적분영역은 그림 3에 나타나 있는 것과 같이 매우 복잡하게 이루어진다. 이러한 영역을 Marco와 Valdes(1998)는 4개의 영역으로 구분하였으며, 4개의 영역은 강우 Coverage를 중심으로  $c=0$ 과  $c=1$  조건 사이에 위치한다. 이 때  $c=1$ 인 경우는 지금까지 제시되어왔던 동역학적 홍수빈도모형에 해당하는 경우이며, Coverage가 1보다 작은 경우가 되면 영역의 형상은  $c=1$ 인 경우와 유사하나 강우강도 및

유역반응시간이 달라지게 된다.

강우 Coverage가 1인 경우, 적분영역은 두 가지 부분으로 구분될 수 있다. 하나는 강우의 지속시간이 유역의 집중시간보다 작은 경우에 해당하는 부분이며, 나머지 부분은 집중시간보다 강우의 지속시간이 큰 경우로 이론상 집중시간에서 유역은 평형상태에 도달하게 된다. 강우 Coverage가 1보다 작은 경우, 즉 Partial Coverage가 발생했을 경우 Coverage가 1인 경우에서 발생하는 홍수량과 같은 양이 발생하려면 유역 내 강우발생 영역에서의 강우강도는 증가해야하며, 평형상태에 도달하기 위한 집중시간은 감소해야 한다. 다시 말하면, 이러한 현상은 유역이 평형상태에 보다 빨리 도달하게 되므로, 동일한 크기의 홍수량을 나타내기 위해서 보다 많은 양의 강우가 필요함을 의미한다.

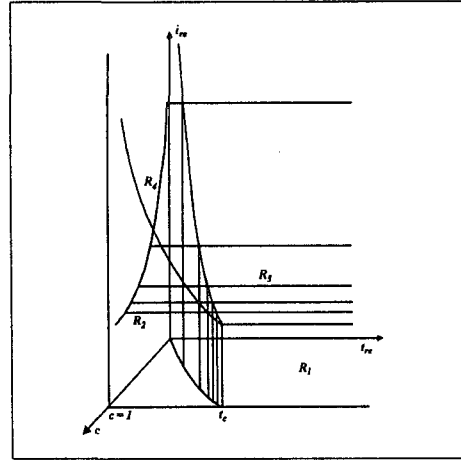


그림 3. 첨두유량의 누가분포

과거 연구결과로부터 제시된 첨두홍수량의 누가확률분포는 유출에 영향을 미치는 면적  $S_e$ 로부터 발생되는 홍수량의 분포, 즉  $F(Q_P | S_e)$  와 같다. 이 때 강우 Coverage를 고려하게 되면,  $S_e$ 는 유역면적  $S_c$ 와 Coverage  $c$ 의 곱과 같은 값이 되며, 첨두홍수량의 누가분포는  $F(Q_P | cS_c)$ 의 관계로 나타낼 수 있다. 여기서 Coverage  $c$ 에 대한 조건부확률 성분은 강우 Coverage의 확률밀도함수  $f_c(c)$ 를 곱하여 적분함으로써 제거할 수 있다. 또한 강우 Coverage 분포는 Full Coverage를 나타내는 이산확률분포  $P(c=1)$ 와 Partial Coverage를 나타내는 연속확률분포로 이루어지므로, 강우 Coverage의 영향이 포함된 누가확률분포 식은 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$F(Q_P) = P(c=1)F(Q_P | S_c) + \int_0^1 F(Q_P | cS_c)f_c(c)dc \quad (7)$$

식 (7)은 앞서 제시된 Coverage의 확률분포식과 동역학적 홍수빈도분석 모형에서 제시된 첨두홍수량의 누가확률분포 관계식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(Q_P) = P(c=1)[1 - \lambda \exp(-\sigma)\Gamma(\sigma+1)\sigma^{-\sigma}(I + \sum J_i)] + \int_0^1 [1 - \lambda \exp(-\sigma)\Gamma(\sigma+1)\sigma^{-\sigma}(I + \sum J_i)]f_c(c)dc \quad (8)$$

여기서,  $\lambda$ 는 유역의 평균강우지속시간의 역수이며,  $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수,  $\sigma$ 는 다음 식 (9)와 같이 표현될 수 있고,  $I$ 와  $J_i$ 는 각각 식 (10), (11)과 같이 나타내어진다.

$$\sigma = \lambda(0.2\beta^* S/\lambda)^{1/2} \quad (9)$$

$$I = \int_{2.2962 Q_P^*^{-0.41/K_1}}^{\infty} \exp(-\lambda t_{re} - 1.39047 \beta^* S^{0.44161} Q_P^*{}^{0.55839} t_{re}^{-0.44161}) dt_{re} \quad (10)$$

$$J_i = \int_{a_i Q_P^*^{-0.41/K_1}}^{b_i Q_P^*^{-0.41/K_1}} \exp(-\lambda t_{re} - 1.39047 \beta^* S^{0.44161} [2(c_i Q_P^*)^{d_i}/0.871 K_1 t_{re}]^{0.55839/e_i} t_{re}^{-0.44161}) dt_{re} \quad (11)$$

위 식에서  $S$ 는 SCS 유효우량법에서의 최대잠재보유수량(mm)이며,  $Q_P^*$ 는 첨두유량  $Q_P$ 를 유역면적으로 나눈 유출고(mm)를 의미한다. 또한  $a_i, b_i, c_i, d_i$ 는 표 1에 정리되어 있는 것과 같은 값을 갖는 계수이며,  $\beta^*$ 는 유역의 평균지점강우강도  $\beta$ 에 대해 면적우량환산계수를 적용한 결과를 의미한다. 마지막으로  $K_1$ 은 유역의 지형학적 특성인자들로 이루어진 변수로서, 식 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$K_1 = (A_\alpha R_L)^{2/5} \alpha_\alpha^{3/5} / L_\alpha \quad (12)$$

여기서,  $R_L$ 은 유역의 길이비,  $\alpha_\alpha$ 는 수로의 운동파변수( $\text{sec}^{-1} m^{-1/3}$ )이며,  $L_\alpha$ 는 최고차수 하천의 수로길이(km)를 의미한다.

표 1.  $J_i$ 의 계수

I	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
1	0.0000	0.1235	0.5000	1.0000	1.4000
2	0.1235	0.5033	0.6529	1.1081	1.5081
3	0.5033	1.2216	0.8048	1.3640	1.7640
4	1.2216	2.2962	1.0000	3.1358	3.5358

식 (8)에서 첫 번째 항은 강우의 Complete coverage에 대한 부분이며, 나머지 적분 항으로 표현된 부분은 Partial coverage에 의한 영향을 반영하기 위한 부분이 된다. 식 (8)을 좀더 자세하게 나타내면 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 관계식이 강우의 Coverage에 대한 영향이 포함된 동역학적 홍수빈도모형의 기본식이 된다.

$$F(Q_p) = P(c=1)[1 - \lambda \exp(-\sigma)\Gamma(\sigma+1)\sigma^{-\sigma}(I + \sum f_i)] + \int_0^1 f_c(c)dc - \lambda \exp(-\sigma)\Gamma(\sigma+1)\sigma^{-\sigma} \cdot [A_1 + A_2] \quad (13)$$

여기서,  $A_1$  과  $A_2$  는 다음 식 (14), (15)와 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$A_1 = \int_0^1 \int_{2.2962 \cdot (Q_p/cA_c)^{-0.41K_1}}^{\infty} \exp\{-\lambda t_{re} - 1.39047 \beta^* S^{0.44161} (Q_p/cA_c)^{0.55839} t_{re}^{-0.44161}\} \cdot f_c(c) dt_{re} dc \quad (14)$$

$$A_2 = \sum_{i=1}^4 \int_0^1 \int_{a_i(Q_p/cA_c)^{-0.41K_1}}^{b_i(Q_p/cA_c)^{-0.41K_1}} \exp[-\lambda t_{re} - 1.39047 \beta^* S^{0.44161} \{2(c_i Q_p/cA_c)^{d_i}/0.871K_1 t_{re}\}^{0.55839/e_i} t_{re}^{-0.44161}] f_c(c) dt_{re} dc \quad (15)$$

따라서, 식 (13)을 기본식으로 (14) 및 (15)의 관계를 이용하여 강우 Coverage의 영향이 포함된 동역학적 홍수빈도방법에 있어 첨두유량  $Q_p$  에 대한 비초과확률값을 결정할 수 있다. 이와 같이 제시된 첨두유량  $Q_p$  의 누가밀도함수는 직접유출량에 해당하는 성분으로 여기에 기저유출을 합하여 총 유출을 결정하게 되지만, 일반적으로 홍수 시 기저유출은 첨두유량에 비해 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 누가밀도함수와 다음 식 (16)의 재현기간과의 관계를 이용하면 해당 홍수량에 대한 재현기간을 결정할 수 있다.

$$T_E = [\theta(1 - F(Q_T))]^{-1} \quad (16)$$

여기서,  $T_E$  는 특정 첨두홍수량  $Q_T$  의 재현기간을 나타내며,  $\theta$  는 해당 구역에서의 연평균 호우수(개)를 의미한다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 Marco와 Valdes(1998)에 의해 제시된 강우 Coverage 개념을 바탕으로 빈도홍수량 산정 시 강우의 공간분포특성이 반영될 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 위해 강우 Coverage 개념 및 동역학적 홍수빈도분석 모형에 대한 기본적인 검토를 수행하였다. 구역에서의 유출특성에 영향을 미치는 인자 중 강우의 공간적인 분포특성 또한 그 중 하나이며, 본 연구에서는 이를 강우 Coverage라는 개념으로 동역학적 홍수빈도분석 모형에 반영하여 새로운 관계식을 제시할 수 있었다.

그러나 본 연구는 기존의 방법과의 비교 분석을 수행함으로써 모형의 적용성을 파악할 필요가 있으며, 이는 적절한 대상유역을 선정하여 실제 관측자료에 대한 Coverage 분석을 수행하고 아울러 그 결과를 빈도분석 모형에 적용함으로써 가능할 것이다. 아울러, 확률홍수량의 빈도가 강우의 Coverage 에 대해 어떠한 변화양상을 나타내는 지에 대한 충분한 검토가 필요하며, 이를 통해 그 영향에 대한 정량화도 가능할 것으로 기대한다.

## 6. 참고문헌

- Eagleson, P.S. 1972, "The Distribution of Basin Coverage by Stationary Rainstorms", *Water Resour. Res.*, Vol. 20, No. 5, pp. 581~590.
- Foufoula-Georgiou, E. 1989, "A Probabilistic Storm Transposition Approach for Estimating Exceedance Probabilities of Extreme Precipitation Depths", *Water Resour. Res.*, Vol. 25, No. 5, pp. 799~815.
- Marco, J.B. and Valdes, J.B. 1998, "Partial Area Coverage Distribution for Flood Frequency Analysis in Arid Regions", *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 9, pp. 2309~2317.
- Osborn, H.B. and Larsen, E.M. 1973, "Thunderstorm Runoff in Southeastern Arizona", *J. Hydraul. Div.*, ASCE, No. 99, pp. 1129~1145.
- Raines, T.H. and Valdes, J.B. 1993, "Estimation of Flood Frequencies for Ungaged Basins", *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 10, pp. 1138~1154.