

연안유역의 극치수위에 대한 근사 결합확률 분석에 관한 연구

Approximate Joint Probability Analysis of Flood Levels in Coastal Catchments

이영민¹⁾ · 송시훈²⁾ · 지홍기³⁾ · 이순탁⁴⁾

1. 서 론

하천에서의 홍수위에 영향을 미치는 인자들은 그 종류가 매우 다양하다. 특히 해양과 인접한 유역에서는 조위의 변동과 같은 해양의 작용이 홍수위 예측에서 무시할 수 없는 인자로 작용한다. 이와 같이 다양한 인자들의 복합적 상호작용에 따른 결합확률효과로 인해서 극치수위계열에 대한 빈도분석은 그 과정이 매우 복잡하다. Spry와 Thiering(1987)은 설계 홍수위 산정에 있어서 결합확률법을 적용하지 않은 기존의 분석이 과대한 홍수위 예측으로 이어질 수 있다고 지적하였으며, Heideman 등(1989)은 기존의 분석법을 통해서 해안구조물의 설계량을 산정한 결과, 동일조건에서 결합확률법에 의해 산정된 구조물의 설계량보다 약 30% 정도가 더 큰 것으로 나타났다고 밝혔다. 그러나 결합확률분석은 대규모 연속모의가 필요하고 한정된 자료들로부터 다변량 확률분포를 규명해야 하므로 정확히 수행하기가 매우 어렵다. 그러므로 적용절차를 보다 간편화한 근사결합확률분석기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 강우유출과 해수위가 홍수위에 복합적으로 영향을 미치는 지역에서 강우와 해수유입에 대한 연속 모의모형을 구성하고 분석유역의 연 최고수위 분포를 근사결합확률법으로 추정하여 적합성을 분석하였다.

2. 모형의 구성

본 연구에서 적용한 모형의 구성도는 Fig. 1과 같고, 유역의 유출추적은 Clark 기법을 이용하였으며, 초기손실은 토양수분 부족으로 보고 이를 모형의 구성에 반영하였다. 물수지 분석은 일중발산량을 2.5mm로 설정하고 토양저류와 침투에 의한 지하수 저류량을 고려하여 일별로 분석하였으며, 최대 손실량은 60mm로 설정하였다.

저류효과에 버금가는 동적효과를 고려해 주기 위해서 홍수터를 평대지로 가정하였으며, 홍수터에서 해양으로 연결되는 하도에서의 흐름은 St. Venant 방정식을 이용하여 모형화하였다. 하류의 경계조건은 해수위의 시계열로 정의하였고 상류의 경계조건은 홍수터의 수위로 정의하였다. 홍수터와 하구하도 사이의 상호작용은 홍수터로부터 평대지에 대한 추적을 위해서 저류량-유량 관계로 규정하였다.

2.1 해수유입에 따른 첨두수위의 민감도

Lambert(1994) 등에 의해 제시된 민감도 이론은 연안유역에서 첨두수위가 해수 유입에 많

1) 영남대학교 토목공학과 대학원 박사과정

2) 영남대학교 토목공학과 대학원 박사수료

3) 영남대학교 토목공학과 교수, 공학박사

4) 영남대학교 토목공학과 교수, 공학박사 · 이학박사

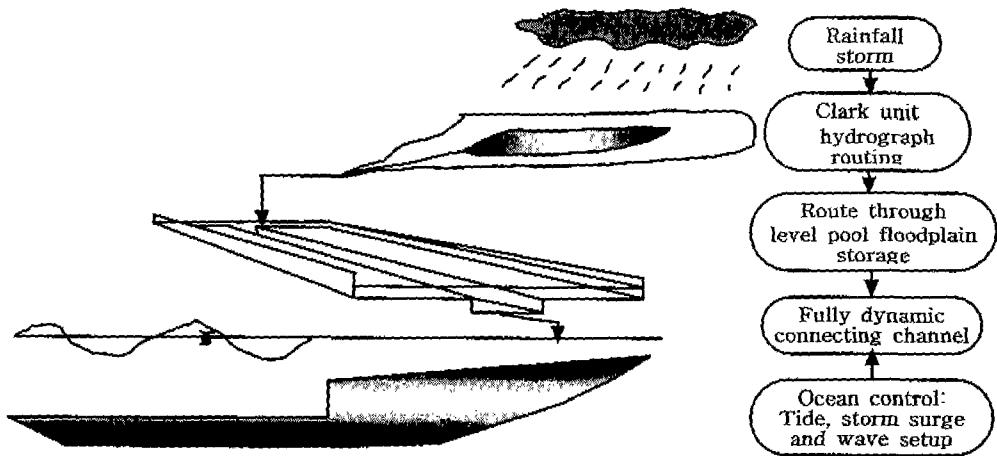


Fig. 1. Schematic of the simulation model

은 영향을 받지 않을 정도로 관성이 충분히 큰 지역임을 확인하는데 사용된다. 민감도 S_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$S_n = \frac{A - B}{A} \quad (1)$$

여기서, A 와 B 는 Fig. 2에서와 같이 평균수위에 대한 해수위 영향의 유무에 따른 첨두수위이고 $A > B$ 경우에 S_n 은 0~1의 범위를 가진다. $A < B$ 인 경우도 존재하지만 이러한 경우 해수위의 영향을 고려한 첨두수위보다 낮은 수위를 유지하므로 본 연구의 대상이 되는 연별 최대 수위 계열에는 포함되지 않는다.

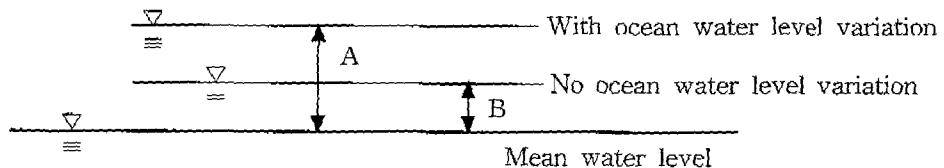


Fig. 2. Definition of the peak water levels in the sensitivity measure

2.2 회귀분석

조석의 영향을 받는 해안유역에서 가장 지배적인 변수는 조석범위(R)와 홍수터면적(A_{fb}), 하구하도의 폭(W), 하구하도의 길이(L)이다. 이들의 관계를 간단한 곱의 형태로 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$S_n = 458 \left(\frac{R}{D_0} \right)^{1.91} \left(\frac{A_{fb}}{D_0^2} \right)^{-0.54} \left(\frac{W}{D_0} \right)^{0.72} \left(\frac{L}{D_0} \right)^{-0.35} \quad (2)$$

이와 유사하게 저기압성 해일의 첨두수위와 호우의 최대강우가 동시에 일어났을 때를 검토해 보면 기상학적 해일의 진폭(SS) 항을 추가한 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$S_n = 458 \left(\frac{R}{D_0} \right)^{1.91} \left(\frac{A_{fp}}{D_0^2} \right)^{-0.54} \left(\frac{W}{D_0} \right)^{0.72} \left(\frac{L}{D_0} \right)^{-0.35} \left(\frac{SS}{D_0} \right)^{0.27} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 홍수터 평대지의 면적에 대한 민감도를 나타내고 있으며, 하구하도의 유출량에 따른 민감도의 거동은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$S_c = 1.35 \left(\frac{l}{L} \right)^{0.72} \left(\frac{R}{D_0} \right)^{0.5} S_n^{0.37}, \quad S_n < S_c \leq 1 \quad (4)$$

여기서, l 은 홍수터 평대지로부터 하구하도의 각 부분까지의 거리이다.

2.3 해수유입에 따른 결합확률

해수의 유입이 일정한 주기를 가지는 경우에 대한 확률간의 상호관계는 다음과 같다. 먼저, N 개의 동일한 시간간격으로 해수의 유입을 세분하여 각각의 시간간격을 하나의 상자(bin)로 표시하고 연간 i 번째 상자의 범위에서 시작하여 홍수터로의 유출을 발생시키는 모든 호우사상의 집합을 Ω 로 규정하였다. 무작위 변수 W_i 를 호우사상의 집합 Ω 에 의해 일어나는 특정지점 P 에서의 최고수위라 하고 W 는 P 지점의 각 연별 최고수위라 하면

$$\begin{aligned} W &= \max[W_1, \dots, W_N] \\ P(W \leq w) &= P(W_1 \leq w, \dots, W_N \leq w) = \prod_{i=1}^N P(W_i \leq w) \end{aligned} \quad (5)$$

로 표현 할 수 있다. p_b 를 하나의 상자(bin)의 범위 내에서 유출을 발생시키는 호우사상이 적어도 하나 이상일 확률이라 하고, 전 확률이론을 적용하면 식(6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(W_i \leq w) &= P(W_i \leq w | \geq 1 \text{ storms in bin } i)p_b + P(W_i \leq w | 0 \text{ storms in bin } i)(1 - p_b) \\ &= F_i(w)p_b + 1 - p_b \end{aligned} \quad (6)$$

지점 P 에서 수위 w 가 최대조석수위를 초과한다고 가정하면 확률 $P(W_i \leq w)$ 은 1이다. $W_i \leq w$ 인 확률을 $F_i(w)$ 라 하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_i(w) = \bar{F}(w) + \Delta F_i(w) \quad (7)$$

여기서, $\bar{F}(w)$ 는 평균확률, $\Delta F_i(w)$ 는 평균에 대한 $F_i(w)$ 의 편차이다. $\sum_{i=1}^N \Delta F_i(w) = 0$ 이므로 편차 $\Delta F_i(w)$ 가 매우 작은 것으로 가정하고 식 (5)에 식 (6)과 (7)을 대입하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(W \leq w) &= [1 - p_b + p_b \bar{F}(w)]^N \prod_{i=1}^N \left(1 + \frac{p_b \Delta F_i(w)}{1 - p_b + p_b \bar{F}(w)} \right) \\ &= [1 - p_b + p_b \bar{F}(w)]^N \xrightarrow{N \rightarrow \infty} e^{-p_b N(1 - \bar{F}(w))} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)은 연 최고수위분포 $P(W \leq w)$ 와 최고수위분포 $F_i(w)$ 사이의 결합을 보여주고 있다.

3. 근사결합확률분석 기법

본 연구에 적용된 모의기법을 통해 연 최고수위분포를 추정할 수 있는 몇 가지 방법에 대해 고찰하였다. 확률 $P(W \leq w)$ 를 구하기 위한 세 가지 근사법은 다음과 같다.

3.1 Binned 분포법

각각의 상자와 평균재현기간(ARI)에 대해 임계 설계호우를 구하고 이 호우를 강우-유출모형으로 추적하여 $1 - \frac{1}{ARI}$ 의 연 초과확률을 가지는 임의 지점 P에서의 수위를 계산하였다. 이에 따라 i 번째 상자에 대해 유도된 수위를 확률분포 $G_i(W)$ 로 규정하였다. 그러나 분포 $G_i(w)$ 는 연별 초과확률을 대표하는 것이기 때문에 주어진 특정 상자의 초과확률이 필요한 식 (5)에 사용할 수 없다. 그러므로 식 (8)의 역을 이용하여 분포 $G_i(W)$ 를 i번째 상자의 범위 내에서 유출이 시작되는 주어진 수위분포로 변환한다. 즉,

$$F_i(w) = \frac{G_i(w)^{\frac{1}{N}} - 1 + p_b}{p_b} \quad (9)$$

이전에 식 (9), (5), (6)을 사용하여 변환한 분포 $G_i(w)$, $i=1, \dots, N$ 로 $P(W \leq w)$ 를 추정한다. 여기서 유의할 점은 p_b 는 반드시 독립변수로 추정이 이루어져야 한다는 것이다.

3.2 평균수위법

각각의 상자와 평균재현기간에 대하여 임계 설계호우를 구하고 이에 따라 주어진 i번째 상자의 $G_i(w)$ 로 연별 최고수위의 분포를 구한다. 주어진 평균재현기간에 대하여 기대되는 평균수위는 다음과 같다.

$$w(ARI) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i^{-1}\left(1 - \frac{1}{ARI}\right) \quad (10)$$

여기서, $G_i^{-1}(u)$ 는 연 초과확률 $1-u$ 를 가지는 i번째 상자의 수위이다.

3.3 중첩법

조석현상이 발생하지 않을 경우의 수위 $G_o(w)$ 를 가정하여 연 최고수위분포를 추정한다. 전 확률이론(total probability theorem)을 적용하여 조석정보를 중첩하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$P(W \leq w) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_0(w - t_i + m) \quad (11)$$

여기서, m 은 P점에서의 평균수위이고 t_i 는 동일지점 i번째 상자 범위 내에서의 조석수위이다.

4. 모형의 적용

본 분석을 위해 임의로 선정된 4개 연안유역의 특성치들을 Table 1에 나타내었다. 각 유역에서의 조석 정보는 12시간의 주기를 갖는 sine파 가운데 조석현상이 발생하지 않는 경우와 조석이 4m인 경우로 설정하였다. 민감도 S_n 값은 48시간의 지속시간을 갖는 호우사상의 100년 빈도 강우깊이에 해당하는 280mm인 경우에 대해 계산된 값이다. 매개변수 T_{ave} 는 유출시작시간으로부터 최고수위에 도달할 때까지 걸리는 평균시간이다.

Table 1. Characteristics of coastal catchments used in simulation

Parameter	$A(\text{km}^2)$	$A_{fp}(\%)$	$L(\text{km})$	$W(\text{m})$	n	$S_o(\%)$	S_n	p_b	$T_{ave}(\text{hr})$	
Catchment	1	10	5	0.5	10	0.030	0.1	0.15	0.5	5.3
	2	10	5	0.5	10	0.030	0.1	0.22	0.5	2.1
	3	100	10	5	30	0.025	0.01	0.032	0.48	15.4
	4	100	10	5	100	0.025	0.01	0.015	0.35	30.7

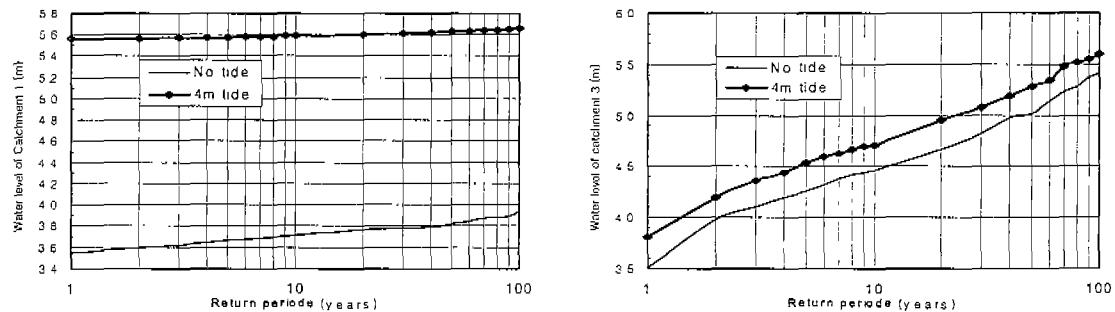


Fig. 3. Annual maximum water level distributions for catchment 1, 3

Fig. 3은 유역 1과 3에서 조석이 없는 경우와 4m인 경우에 홍수터에서의 연 최고수위분포를 나타낸 것이다. 3번 유역의 경우 홍수터가 조석의 영향에 둔감하므로 조석이 없는 경우와 4m인 경우에 대한 수위분포는 유사하였다며, 유역 내의 유출이 수위분포를 지배하는 것으로 나타났다. 4번 유역의 거동은 3번 유역과 유사하였다. 이와는 달리 1번 유역은 조석 정보에 대해 매우 민감한 홍수터의 영향으로 조석현상의 유무에 따른 수위분포의 차가 매우 큰 것으로 나타났다. 그러므로, 1번 유역에 대해서는 결합화를 효과를 반드시 고려해주어야 한다. 2번 유역은 1번 유역보다 더욱 민감하게 반응했으며 조석현상에 따른 수위분포의 차도 훨씬 큰 것으로 나타났다.

전기한 세 가지 근사법으로 홍수터 평대지에서의 연별 최고 수위분포를 추정하였다. Fig. 4는 Table 1에서 제시한 각 유역에 대해 본 연구에서 적용된 모형에 의한 수위분포형과 위에서 제시한 세 가지 근사법에 의한 수위분포형을 나타낸 것이다. 분석에 이용된 상자의 수는 30개로 하였다.

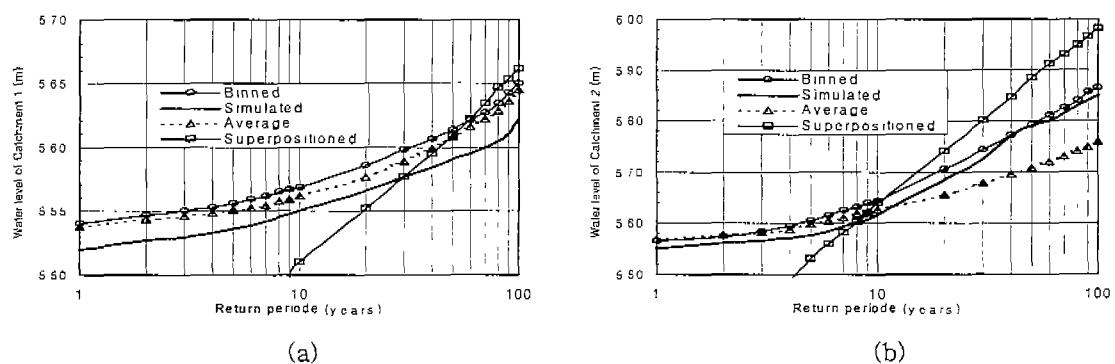


Fig. 4. Comparison of annual maximum water level distributions with 4m tidal range I

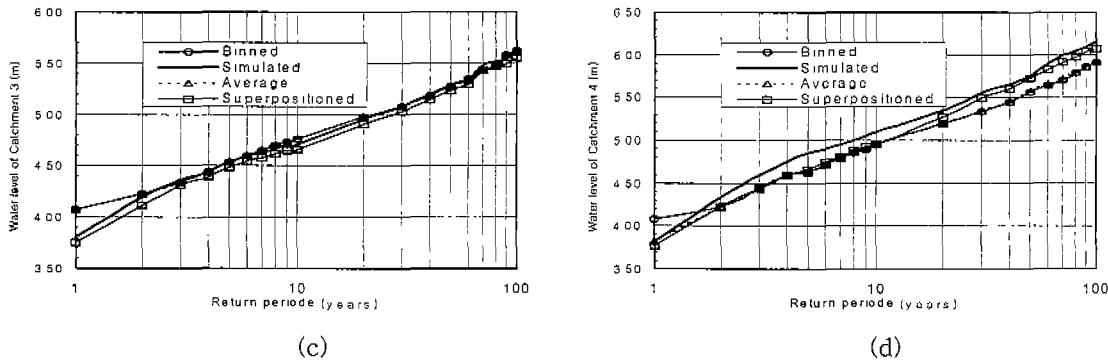


Fig. 4. Comparison of annual maximum water level distributions with 4m tidal range II

5. 결 론

강우유출과 해양의 작용이 홍수위에 복합적으로 영향을 미치는 유역에 대한 모의모형을 구성하고 그 지역의 연 최고수위 분포를 세 가지 근사결합확률법으로 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 세 가지 근사결합확률분석법 중에 binned 분포가 가장 신뢰성이 있었다. 응답시간이 큰 유역(1, 3, 4번 유역)에 대해서는 평균수위법도 좋은 결과를 얻을 수 있었으나 호우사상에 대해 약 2시간의 응답시간을 갖는 2번 유역에 대해서는 적합성이 현저히 떨어지는 현상이 나타났다.

둘째, binned 분포형과 본 연구에 적용된 모형의 분포형 사이의 불일치는 설계호우의 산정에 있어 초기손실에 대한 보정은 Y년 설계호우로부터 홍수터로 유입되는 Y년 첨두 홍수량을 산정하여 보정되지만 실제 홍수터의 역학적 관계는 첨두 유입량보다는 유출용적에 의해 지배되기 때문이고, 식 (9)로 표현된 변환식을 사용할 때 상자들 사이의 확률변수 $\Delta F_i(w)$ 를 매우 작은 값으로 가정하여 시스템의 관성이 감소하는 것과 같은 영향을 받았기 때문이다.

민감도 S_n 은 지점에 따른 결합확률분석의 수행여부를 결정하는 지표로 사용할 수 있으나 보다 정확한 판단을 위해서는 지속적인 연구를 통해 검정이 이루어져야 할 것이다.

참고문현

- Heideman J.C., Hagen, O., Cooper C. and Dahl F.(1989), Joint Probability of Extream Waves on Norwegian Shelf, ASCE, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 115 No. 4, p.534-546.
- Lambert M., Williams B.J., Field W.G. and Kuczera G.(1994), A Taxonomy of Joint Probability Effects in Coastal Floodplains, International Hydrology and Water Resources Symposium Adelaide, The Institution of Engineers, Australia.
- Spry R.B. and Thiering C.G.(1989), Towards a Practical Flood Level Estimation Method for Combined Flooding, Hydrology and Water Resources Symposium, Christchurch, Institution of Engineers, Australia.
- Walsh M., Pilgrim D. and Cordery I (1991), Initial Losses for Design Flood Estimation in NSW, International Hydrology & Water Resources Symposium.
- US Army Corps of Engineering Center(2001), HEC-HMS Users manual.