

홍수예경보 이론 고찰

권오익 (한국건설기술연구원 수자원환경부 선임연구원)

1. 서론

홍수란 물이 많아 생기는 물난리로 일종의 자연현상이라 할 수 있다. 홍수는 그 요인에 따라 외수와 내수로 구분되며 유형에 따라서는 하천·도시·돌발·해안 홍수 등으로 분류되기도 한다. 예나 지금이나 홍수로부터 자유로웠다는 시절은 들은 적이 없으며, 그랬기에 예로부터 치수는 통치자의 능력을 가늠하는 척도가 되어 왔다. 제(提), 소(疎), 준(浚)의 조합으로 회자되는 고전적인 치수대책은 아직도 구조물적인 홍수조절방안의 기초를 이루고 있으며, 인류의 발전과 함께 고도로 개발된 각종의 기술은 비구조물적 홍수조절방안인 홍수예경보에 집약되고 있다. 홍수예경보란 수계내의 홍수방어 구조물을 최대한 이용하여 홍수를 조절하되 그래도 안되면 피해예상 지역의 인명과 재산을 도피시켜 피해를 최소화시키려는 자연에 대한 인간의 생존전략이라 할 수 있다. 도전과 응전이라는 인간과 자연간의 끊임없는 질곡 속에 매번 쳐다본 하늘에는 인간의 눈물이 흐르고 있다.

1974년 한강을 시작으로 구축된 우리의 홍수예경보는 현재 5대강 유역과 일부 중소하천에서 운영중이며 지속적인 개선사업을 통해 꾸준한 향상을 기하고 있다. 이에 본 기사에서는 선진 연구사례를 소개하면서 25년의 역사를 가진 우리의 홍수예경보가 나아갈 방향에 대해 생각해 보고자 한다.

2. 홍수 예경보 이론

홍수 예경보의 목적은 사전에 미리 홍수를 감지하

여 홍수전파에 대한 예측과 판단을 토대로 위험상황을 사전에 국민에게 알려줌으로써 홍수로 인해 위험에 직면할 국민들의 생명과 재산을 보호하는데 있다. 따라서 홍수예경보 시스템은 그 목적에 따라 감지시스템과 예측시스템, 예경보의 유무를 결정하는 결정시스템으로 구성되는 것이 일반적이다. 즉, 감지시스템에 의해 홍수가 감지되면 예측시스템에 의해 발생하게 될 홍수의 크기와 지속기간, 발생시간 등이 예측되고 이를 바탕으로 결정시스템에 의해 홍수예경보의 발령유무가 결정되는 것이다. 감지시스템과 예측시스템은 기술적인 한계에 따른 많은 불확실성이 내재되어 있으므로 결정시스템에서는 이러한 불확실성 등을 모두 고려하여 종합적인 결정이 최종적으로 내려져야 한다. 국내외의 모두 명확히 정의된 홍수예경보의 이론은 없으나 외국의 경우에는 학술지를 통해 홍수예경보의 이론에 관한 독자적인 연구들이 간헐적으로 소개되고 있다. 본 기사에서는 이중 Krzysztofowicz (1993)의 홍수예경보 이론을 본 기사 나름대로의 거친 이해를 바탕으로 소개하고자 한다.

2.1 감지 시스템 이론

1) 감지시점

홍수예경보에 있어서 홍수에 대한 감지시점은 사전에 정해진 기준에 따라 인식될 수 있으며, 정해진 기준이란 다음과 같은 항목의 조합으로 구성된다.

- ① 관측된 하천수위 > 정해진 기준
- ② 관측된 강우 강도와 지속시간 > 정해진 기준
- ③ 예측된 24시간 강우량 > 정해진 기준
- ④ 기타

표 1. 감지능력과 관련하여 정의된 확률($\pi_{T\theta}$)

감지변수(T)	홍수변수(θ)	
	0	1
0		π_{01}
1	π_{10}	π_{11}

2) 감지능력(γ, ρ)

감지 시스템의 능력을 통계적으로 설명하기 위해 2개의 이변수(T, θ)를 소개하며 각 변수의 정의는 다음과 같다.

T : 감지변수(홍수가 감지되었다면 $T = 1$, 감지되지 않았다면 $T = 0$)

θ : 홍수변수(홍수가 발생되었다면 $\theta = 1$, 발생되지 않았다면 $\theta = 0$)

랜덤벡터(T, θ)는 $T + \theta \geq 1$ 조건하에서 3가지의 상황이 있을 수 있다. (0, 1)은 홍수가 감지되지 않았는데 홍수가 발생한 경우이며, (1, 0)은 홍수가 감지되었으나 홍수가 발생하지 않은 경우를 말한다. (1, 1)은 홍수가 감지되었고 홍수도 발생한 경우를 나타낸다. 각각의 발생확률은 식(1)과 같은 결합확률로 계산할 수 있으며 이들의 경우의 수를 나타낸 것이 표 1이다. 표 1에 나타난 각각의 발생확률을 모두 더하면 식(2)와 같이 1이 되며 따라서 식(3)과 식(4)와 같은 조건부 확률이 정의될 수 있다.

$$\pi_{T\theta} = P(T, \theta | T + \theta \geq 1) \tag{1}$$

$$\pi_{01} + \pi_{10} + \pi_{11} = 1 \tag{2}$$

$$\gamma = P(\theta = 1 | T = 1) = \frac{\pi_{11}}{\pi_{10} + \pi_{11}} \tag{3}$$

$$\rho = P(T = 1 | \theta = 1) = \frac{\pi_{11}}{\pi_{01} + \pi_{11}} \tag{4}$$

식(3)의 확률 γ 는 감지시스템의 식별정도를 나타내는 것으로 γ 값이 1인 경우, 감지시스템은 모든 홍수상황에 대해 완벽히 식별하였다는 의미를 나타낸다. 식(4)의 확률 ρ 는 감지시스템의 신뢰정도를 나타내는 것으로 ρ 값이 1인 경우, 감지시스템은 도래하는 홍수

를 식별해내는데 결코 실패한 일이 없다는 의미이다. 그러나 현실적으로 γ 와 ρ 값이 1이 되는 경우를 기대하기란 매우 어려운 일일 것이다. 완벽한 홍수의 감지를 위해서는 시스템의 구성요소(하드시스템과 소프트시스템)가 항상 고장없이 작동되어야 하며 감지기준 또한 모든 가능성을 감지하기 위해 보다 다양화 되어야 한다. 발생하는 홍수이외에도 여러 가지 유사상황을 감지하여야 하는 감지시스템의 식별특성을 감안할 때, 홍수감지의 신뢰정도가 높아질수록 감지시스템의 식별정도는 낮아지게 될 것이다. γ 와 ρ 모두 홍수사상에 대해 정해진 기준과 밀접한 관계가 있으며, ρ 의 경우에는 또한 시스템의 구성요소에 대한 신뢰도와도 관계가 있다.

3) ρ 의 구조

γ 와 ρ 를 추정하는 방법으로는 빈도분석이외에도 홍수발발에 대한 다양한 수문학적 정의와 예측시스템의 다양한 기술적인 구성요소들을 연관시킨 모형이 있을 수 있다. 감지시스템의 신뢰정도를 나타내는 ρ 의 경우 홍수발발에 대한 수문학적인 신뢰성($P(TH | \theta = 1)$)과 예측시스템의 기술적인 신뢰성($P(TT | \theta = 1)$)을 나타내는 2개의 항으로 재구성하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다. $P(TH | \theta = 1)$ 는 홍수에 앞서 감지사상이 발생한 확률이며, $P(TT | \theta = 1)$ 는 홍수가 발생할 때 마다 모든 시스템의 구성요소인 하드웨어와 소프트웨어가 운영되는 확률이다.

$$\rho = P(T=1 | \theta=1) = P(TH | \theta=1) P(TT | \theta=1) \tag{5}$$

홍수발발에 대한 수문학적인 신뢰성은 도래하는 홍수 특성과 관련이 있으며 이중 침투홍수위(h)와 연관시킨다면 $P(TH | h, \theta = 1)$ 로 표현되며 이때, ρ 는 h 의 함수로 $\rho(h) = P(T = 1 | h, \theta = 1)$ 와 같이 표시된다. $\theta = 1$ 이라는 가정하에 변수 T 는 h 와 확률적으로 서로 독립이므로 식(6)과 같이 표시되며 결과적으로 ρ 는 식(4) 표시된 바와 같이 상수가 된다.

$$P(T=1 | h, \theta=1) = P(T=1 | \theta=1) \quad (6)$$

4) 홍수발발의 기대수($E(N_s)$)

과거 홍수자료와 γ 와 ρ 를 이용하여 연간홍수사상수에 대한 기대수($E(N_s)$)를 추정하기위해 2개의 이산형 변수 N_s 와 N_T 를 정의하면 다음과 같다. N_s 는 연간홍수사상수이며, N_T 는 연간관측된 감지사상수이다. 연간 발생한 홍수사상은 $T=0$ 인 경우와 $T=1$ 인 경우로 구분할 수 있으며 각각에 대한 기대수는 식(7)과 식(8) 또는 식(9)와 같다. 식(8)과 식(9)를 정리하면 $E(N_T)$ 는 식(10)과 같이 표시된다.

$$E(N_s | T=0) = (1-\rho) E(N_s) \quad (7)$$

$$E(N_s | T=1) = \rho E(N_s | \theta) \quad (8)$$

$$E(N_s | T=1) = \gamma E(N_T) \quad (9)$$

$$E(N_T) = (\rho/\gamma) E(N_s) \quad (10)$$

2. 2 사전 홍수정보 이론

강우-유출모형을 이용하여 예측된 홍수유입량을 근거로 첨두유량의 크기와 발생시간, 지속시간 등을 판단하게 된다. 이때 예측된 유입량에는 불확실성이 존재하므로 이에 대한 정량적인 고려방법이 필요하다. 본 이론에서는 예측된 첨두유량의 크기(s)와 발생시간(ν)에 존재하는 불확실성을 기술하기 위해 과거의 홍수자료로부터 사전정보(prior information)를 이용하고자 한다. 그림 1.에서 홍수단계(flood stage) h_0 는 홍수의 기준이 되는 수위로 독립적인 관찰에 의해 수집된 과거홍수사상의 경우, 모두 그 첨두수위(h)가 h_0 보다 클 것이다. 시점 0(time origin)는 홍수감지시점을 말하며 예측시점(forecast time)은 분석시점을 나타낸다. 과거 홍수사상으로부터 실제의 첨두수위(h)와 분석시점을 기준으로한 첨두발생시간(λ)이 파악된다면, 식(11)과 같은 사전정보($g(h, \lambda)$)를 얻을 수 있을 것이다.

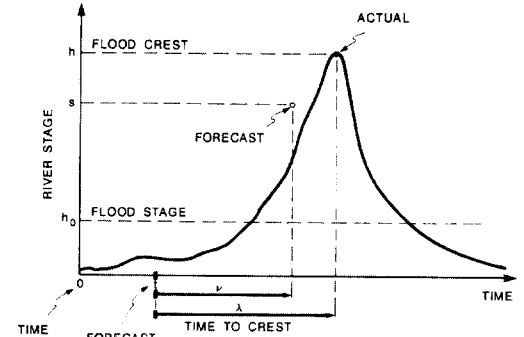


그림 1. 예측된 홍수수문곡선의 정의

$$g(h, \lambda) = g(\lambda | h) g(h) \quad (11)$$

식(11)의 사전결합밀도(joint prior density)에서 각각의 항들은 다음과 같이 정의된다.

$$g(h) = g(h | \theta=1), h > h_0$$

$$g(\lambda | h) = g(\lambda | h, \theta=1) \lambda > 0, h > h_0$$

2.3 예측 시스템 이론

감지 시스템에 의해 홍수가 감지되면 그 다음 단계로 예측시스템을 이용하여 그림 1.에 나타난 바와 같이(s, ν)를 추정하여 실제로 발생할 홍수(h, λ)를 예측하게 된다. 본 이론에서는 실제홍수(h, λ)와 예측홍수(s, ν)사이에서 존재하는 확률론적인 연관성을 기술하고자 한다.

1) 첨두수위(h)

홍수가 감지되어($T=1$) 수문기상학적인 자료를 수집하여 분석시점에서 예측첨두수위 s 를 추정하였으나 실제로 홍수가 발생되지 않았다면($\theta=0$), 이때 s 는 첨두수위로 판명될 수 없으며 이를 수식으로 표현하면 식(12)와 같다. 반면에 홍수가 발생하였다면($\theta=1$), 이때 h 의 추정치로 판단된 s 는 식(13)과 같이 표현된다.

$$k_0(s) = k_0(s | \theta=0, T=1) s > 0 \quad (12)$$

$$f(s | h) = f(s | h, \theta=1, T=1) s > 0 \quad (13)$$

고정된 s 에 대해 함수 $k_0(s |)$ 와 $f(s |)$ 는 각 사상의 우도함수(likelihood functions)의 항이 된다. 이러한 우도함수들이 예측시스템을 구성하며, 각각은 예측과 실측된 과거자료를 이용하여 추정될 수 있다. 실제첨두수위인 h 의 사전밀도(prior density)가 식(11)과 같이 주어졌을 때, 예측된 첨두수위의 예측밀도(predictive density)인 $k(s) = k(s | \theta=1, T=1)$ 는 식(14)와 같이 나타난다.

$$k(s) = \int_{h_0}^{\infty} f(s | h) g(h) dh \quad (14)$$

예측된 첨두수위 s 를 조건으로 실제 첨두수위 h 의 사후밀도(posterior density) $\eta(h | s) = \eta(h | s, \theta=1, T=1)$ 는 베이스 정리(Bayes' theorem)에 의거 식(15)와 같이 표현된다. 식(15)에서 $f(s | h)$ 의 조건은 $\theta=1, T=1$ 인 반면에 $g(h)$ 의 조건은 단지 $\theta=1$ 뿐이다. 따라서 $g(h)$ 의 조건으로 $T=1$ 의 조건도 추가시킨다면 베이스 정리에 의해 식(16)이 되며 또한, 식(6)의 내용을 식(16)에 대입하면 식(17)이 얻어진다.

$$\eta(h | s) = \frac{f(s | h) g(h)}{k(s)} \quad (15)$$

$$g(h | \theta=1, T=1) = \frac{P(T=1 | h, \theta=1) g(h | \theta=1)}{P(T=1 | \theta=1)} \quad (16)$$

$$g(h | \theta=1, T=1) = g(h | \theta=1) \quad (17)$$

2) 첨두발생시간(λ)

실제 첨두발생시간 λ 를 첨두수위 h 에 종속되는 밀도를 가진 무작위 변수(random variable)로 고려한다면, s 의 조건하에 h 와 λ 의 결합밀도 $\eta(h, \lambda | s) = \eta(h, \lambda | s, \theta=1, T=1)$ 는 식(18)과 같이 주어진다.

$$\eta(h, \lambda | s) = g(\lambda | h) \eta(h | s) \quad (18)$$

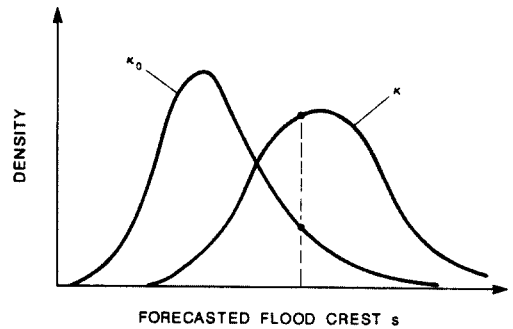


그림 2. 예측된 홍수 첨두수위의 확률밀도함수

3) 홍수의 사후확률(Q(s))

홍수가 감지되고($T=1$), 첨두수위의 추정치 s 가 준비되었을 때, 홍수의 사후확률(posterior probability) $Q(s)$ 는 식(19)와 같다. 추정치 s 의 확률밀도함수는 잇달오는 홍수의 발생유무에 따라 k 또는 k_0 의 밀도(density)에 의거하여 그림 2와 같이 얻어질 것이다.

$$Q(s) = P(\theta=1 | s, T=1) \quad (19)$$

그림 2.에서 두 밀도함수의 중첩부분이 작으면 작을수록 홍수와 비홍수 상황을 식별하는 예측기술의 수준은 높다고 할 수 있다. s 의 무조건 밀도(unconditional density) $\psi(s) = \psi(s | T=1)$ 는 식(20)과 같고, 베이스 정리에 따라 $Q(s)$ 는 식(21)과 같으며 식(20)과 식(21)을 조합하여 재정리하면 식(22)가 얻어진다. 식(22)에서 $\gamma=1$ 이라면 $Q(s)=1$ 이 되며, $k_0 = k$ 인 경우에는 $Q(s)=\gamma$ 가 된다. 또한, k_0 와 k 가 중첩되지 않는 경우에는 $Q(s)=0$ 또는 $Q(s)=1$ 이 된다. $\gamma=1$ 이란 감지 시스템이 모든 홍수상황을 완벽히 식별한 경우이며, $k_0 = k$ 란 홍수발생 유무를 식별하는 것과 관련하여 어떤 정보도 제공되지 않는 상황을 말한다. k_0 와 k 가 중첩되지 않는 경우란 홍수의 발생유무 상황이 완벽히 식별되는 경우이다.

$$\begin{aligned} \psi(s) &= k_0(s | \theta=0, T=1)P(\theta=0 | T=1) \\ &+ k(s | \theta=1, T=1)P(\theta=1 | T=1) \quad (20) \\ &= k_0(s)(1-\gamma) + k(s)\gamma \end{aligned}$$

$$Q(s) = \frac{k(s)\gamma}{\psi(s)} \quad (21)$$

$$Q(s) = \left[1 + \frac{k_0(s)}{k(s)} \frac{1-\gamma}{\gamma}\right]^{-1} \quad (22)$$

4) 수위 구간별 홍수의 사후확률($q(s, y)$)

그림 3.에서 홍수지표로 이용된 수위 h_0 보다 높은 수위인 $y(y > h_0)$ 를 지정하여 $h_0 \sim y$ 구간에 대한 홍수 발생 상황을 고려해 볼 수 있을 것이다. θ 는 이 구간에 대한 홍수지표로써, $\theta=0$ 이란 이 구간에 홍수가 발생되지 않았음을, $\theta=1$ 이란 홍수가 발생되었음을 각각 나타내며 이를 수식으로 정의한 것이 식(23)이다. 홍수가 감지되고($T=1$), 침두수위의 추정치 s 가 준비되었을 때, 이 구간에 대한 홍수의 사후확률 $q(s, y)$ 은 식(24)와 같다. 식(24)에서 H 는 밀도(density) η 에 대응하는 분포이다. 침두수위 h 의 사후밀도(posterior density) $\varphi(h | s, y)$ 는 $T=1, s$ 추정, $\theta(y)=1, h > y$ 인 조건하에 식(25)와 같이 정의되며 $h > y$ 인 조건이므로, $P(h > y | h, s, \theta=1, T=1) = 1$ 이 된다.

$$\begin{aligned} \theta &= \theta(y)=0 \text{ if } \theta=1 \text{ and } h \leq y, \text{ or } \theta=0; \\ \theta &= \theta(y)=1 \text{ if } \theta=1 \text{ and } h > y. \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q(s, y) &= P(\theta(y)=1 | s, T=1) \\ &= P(h > y, \theta=1 | s, T=1) \\ &= P(h > y | s, \theta=1, T=1) P(\theta=1 | s, T=1) \end{aligned}$$

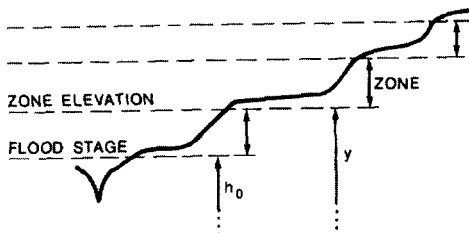


그림 3. 수위구간별 홍수 정의

$$= [1-H(y | s)]Q(s) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varphi(h | s, y) &= \varphi(h | s, \theta(y)=1, T=1) \\ &= \varphi(h | s, h > y, \theta=1, T=1) \\ &= \frac{P(h > y | h, s, \theta=1, T=1) \eta(h | s, \theta=1, T=1)}{P(h > y | s, \theta=1, T=1)} \\ &= \frac{\eta(h | s)}{1-H(y | s)} \quad (25) \end{aligned}$$

2.4. 결정 시스템 이론

1) 결정과정

홍수가 감지되고($T=1$), 홍수 예측치인(s, ν)이 추정되면, 홍수예경보의 의사결정자는 예측치를 토대로 홍수예상구역에 대한 홍수예경보의 발령 유무를 결정하여야 한다. 홍수예경보의 효력은 사전발령에 있으므로 예경보 발령 이후 그 유효함이 평가될 것이다. 그림 4에 나타난 바와 같이 홍수예경보의 발령 유($W=1$), 무($W=0$) 상황과 이후 홍수발생 유($\theta=1$), 무($\theta=0$) 상황에 따라, 각각의 결정-사건(decision-event) 벡터 (w, θ)는 사후의 불만도(undesirability)도 따라 비효율(disutility)을 의미하는 지표($D_{w\theta}$)로 평가될 수 있으며 결국, 기대되는 $D_{w\theta}$ 값을 최소화시키는 결정방안이 얻어지게 될 것이다. 그림 4.에서 D_{00} 란 홍수예경보 발령도 없고 홍수도 발생하지 않은 평온한 일상을 말한다. $D_{01}(h, y)$ 이란 예경보의 발령이 없었는데도 홍수가 발생한 상황으로 홍수감지에 실패

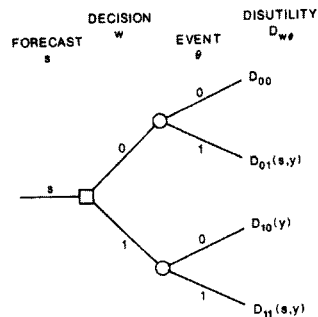


그림 4. 홍수예경보의 발령 유무를 결정하는 의사결정도

하여 홍수침두수위 h 가 발생함에 따라 h 보다 수위가 낮은 y 지역에 홍수가 발생하여 재산과 인명피해는 물론이며 예경보의 존재자체를 불신하는 결과를 낳을 것이다. $D_{10}(y)$ 란 y 지역에 홍수예경보가 발령되었으나 홍수가 발생하지 않은 잘못된 예경보가 발령된 경우로 방재활동에 따른 비용이 발생하였고 예경보의 신뢰성에도 손상이 갈 수 있다. $D_{11}(h, \lambda, y)$ 란 예경보가 발령되었고 발령된 y 지역에 홍수가 발생하여 홍수예경보 본연의 임무를 달성한 경우이다. 이때, 소요되는 방재활동 비용에 대한 손실감소 효과는 경보에 대한 국민 반응에 따라 달라질 것이다.

2) 고려 사항

의사결정자는 결정에 앞서 정치·경제·사회·인간 행동양식 등 다차원적인 고려를 종합하여야 한다. 표 2. 와 표 3. 은 일반적인 의사결정자의 고려사항을 홍수예경보의 발령유무와 결정-사건 벡터의 경우의 수에 대해 각각 제시한 것이다. 경제적인 항목들은 금전적인 평가가 가능하나 사회 및 인간 행동양식에 대한 평가 등은 금전적인 평가가 쉽지 않다. 일례로, 예

표 2. 홍수예경보 발령 유무에 따른 고려 항목 및 평가 방법

의사결정	고려항목	평가항목
$w = 1$	방재활동 비용 생산활동 저해에 따른 기회손실 비용 생활 불편	금전적 금전적 주관적
$w = 0$	없음	-

표 3. 결정-사건 벡터에 대한 고려항목 및 평가 방법

결정-사건 벡터	고려항목	평가항목
$(w = 1, \theta = 1)$	표2의 $w = 1$ 의 항목 재산피해 적절한 방재활동에 따른 만족도 예경보시스템의 신뢰도 향상	금전적, 주관적 금전적 주관적 주관적
$(w = 1, \theta = 0)$	표2의 $w = 1$ 의 항목 불필요한 방재활동에 대한 불만도 예경보시스템의 신뢰도 저하	금전적, 주관적 주관적 주관적
$(w = 0, \theta = 1)$	보호 가능했던 재산피해 구조되었을 인명피해 피해 당사자들의 좌절감 예경보시스템의 존재에 대한 신뢰도 저하	금전적 주관적 주관적 주관적
$(w = 0, \theta = 0)$	없음	

경보시스템에 대한 신뢰도 저하는 차후 발령된 예경보에 대한 둔감한 반응으로 이어지므로 그만큼 재산피해 감소효과가 적어져 궁극적으로는 경제적인 이익이 감소하게 될 것이다. 따라서 이러한 금전적인 평가가 쉽지 않은 항목에 대한 평가 방법이 지속적으로 연구개발되어야 한다.

3) 홍수에 직면한 국민 반응

홍수예경보의 궁극적인 평가는 발령된 예경보에 대한 국민 반응과 예경보 없이도 홍수에 대처하는 국민의식에 달려있다. 발령된 예경보에 대해 나타나는 국민 반응은 지나친 위험인식에 따른 과민반응과 또 잘못 발령된 경보일 것이라는 불신, 스스로의 과거 경험에 따라 대처하는 행동 등 모두 제각각 일 것이다. 따라서 이러한 국민 반응을 모형화하여 예경보 시스템에 통합시키려는 인간 행태학적인 연구들이 진행되고 있다. 인간 행태학적인 연구들은 위험에 처한 인간의 의사결정에 영향을 주는 인자들과 인간의 지각능력, 인식능력의 한계에 관한 방대한 양의 지식을 제공한다. 아직은 대부분이 정성적(qualitative)인 단계이나 Ferrell과 Krzysztofowicz(1983)는 홍수예경보에 대한 국민반응에 대해 잠재적인 행동과정을 정량적으로 모의하려는 시도를 하였고, Pate - Cornell(1986)은 홍수예경보에 대한 반응정도와 감지 및 불신과의 관계를 수학적으로 표현한바 있다. 특히, 돌발홍수에 대한 국지 홍수예경보시스템의 경우, 이러한 홍수에 직면할 국민반응의 본질적인 특성을 모형화하여 결정-사건 벡터에 대한 경우의 수에 고려하는 연구가 필요할 것이다.

4) 비효율성 함수($d_{w\theta}$)의 구성

그림 4.에 표시된 결정-사건 벡터 (W, θ) 의 경우의 수에 대해 만족스럽지 못한 결과에 대한 정량적인 척도로서 도입된 비효율성 함수 $d_{w\theta}$ 를 구성하는 방법은 다음과 같다.

- ① 금전적인 손실(예경보에 따른 방재활동 비용 + 재산피해)
- ② 정신적 피해 및 손실된 인명수
- ③ ①, ②를 포함한 기타 손실

①의 경우 Krzysztofowicz와 Davis(1983a)에 의한 수치적인 모형이 소개된 바 있으며, 가장 현실적이면서도 구축하기 어려운 모형은 ③의 경우일 것이다. 비효율성 함수 d_w 는 의사결정자의 결정에 따른 그 효과를 측정하는 것으로 다차원적인 고려에 따른 상대적인 가치들을 모두 정량화시켜야만 한다.

5) 결정-사건 벡터의 비효율성 평가

결정-사건 벡터(W, θ)의 경우의 수에 대한 비효율성은 D_w 의 함으로 평가될 수 있다. 홍수가 발생하지 않은 경우($\theta=0$)에 대한 비효율성은 $D_{00} = d_{00}$ 와 $D_{10}(y) = d_{10}(y)$ 의 경우로 구분될 것이다. 홍수가 발생한 경우($\theta=1$)에 대한 비효율성은 침투홍수위 h 와 침투수위 도달시간 λ 에 의존하게 되는데 이 값들은 분석 시점 당시에는 정확히 알 수 없는 값으로 홍수가 발생한 사후에 판명되는 값이라는 특성이 있다. 따라서 h 와 λ 는 추정치 s 와 $\theta=1$ 이라는 조건하에 결합밀도를 가지는 무작위 변수로 이들의 결합밀도는 $g(\lambda | h) \phi(h | s, y)$ 로 표시되며 이는 식(25)에서 ϕ 가 주어진 식(18)과 유사한 형태이다. 따라서, y 지역에 s 값이 추정된 경우, D_{w1} 은 각각 식(26)과 식(27)과 같이 정의된다.

$$D_{01}(s, y) = \int_y^\infty d_{01}(h, y) \phi(h | s, y) dh$$

$$= \frac{1}{1-H(y|s)} \int_y^\infty d_{01}(h, y) \eta(h | s) dh, \quad (26)$$

$$D_{11}(s, y) = \int_y^\infty \int_0^\infty d_{11}(h, \lambda, y) g(\lambda | h) \phi(h | s, y) d\lambda dh$$

$$= \frac{1}{1-H(y|s)} \int_y^\infty \left[\int_0^\infty d_{11}(h, \lambda, y) g(\lambda | h) d\lambda \right] \eta(h | s) dh. \quad (27)$$

2.5 최적의 홍수예경보 방안

1) 일반적인 방안($W^*(s, y)$)

위험함수(risk function) $R(s, w, y)$ 은 추정된 s 와 y 에 대한 홍수예경보의 발령유무(w)에 따라 기대되는 비효율성과 관련하여 식(28)과 같이 정의되며, 최적의 결정을 선택하는 기준으로 베이스(Bayes)의 위험함수는 식(29)와 같다. 그 해는 '최적의 예경보 방안'이라 할 수 있는 W^* 함수의 형태를 취하며, 홍수예경보의 발령유무(w)에 따라 $W^*(s, y)$ 는 식(30)과 같이 표시된다.

$$R(s, 0, y) = D_{00} [1-q(s, y)] + D_{01}(s, y) q(s, y),$$

$$R(s, 1, y) = D_{10}(y) [1-q(s, y)] + D_{11}(s, y) q(s, y). \quad (28)$$

$$R^*(s, y) = \min_{W \in \{0, 1\}} R(s, w, y), \quad (29)$$

$$W^*(s, y) = 0 \quad \text{if } s \in S^0(y)$$

$$W^*(s, y) = 1 \quad \text{if } s \in S^1(y), \quad (30)$$

식(30)에서 $S^1(y)$ 는 최적의 경보발령에 대응하는 예측치의 집합으로 $S^1(y) = \{s : q(s, y) > \nu(s, y)\}$ 과 같으며, $S^1(y)$ 의 공역집합인 $S^0(y)$ 는 $S^0(y) = [0, \infty) - S^1(y)$ 과 같다. 예경보를 발령하는 기준확률은 식(31)과 같으며 식(31)에서 $u(s, y)$ 는 비효율성 차이에 대한 비율로 식(32)와 같으며 이는 발생가능한 경우의 수에 대한 상대적인 불만족도를 측정하는 것이다.

$$\nu(s, y) = \frac{u(s, y)}{1 + u(s, y)}, \quad (31)$$

$$u(s, y) = \frac{D_{10}(y) - D_{00}}{D_{01}(s, y) - D_{11}(s, y)} \quad (32)$$

$D_{10}(y) - D_{00}$ 는 예경보의 발령도 홍수발생도 없었던 평온한 경우와 잘못된 홍수예경보의 발령에 따른 상대적인 불만족도를 측정하는 것이고 $D_{01}(s, y) - D_{11}(s, y)$ 는 홍수 감지-예경보 발령-홍수 발생한 경우에 대해 예경보의 발령에 실패하여 대비하지 못한 홍수피해 상황에 대한 상대적인 불만족도를 측정하는 것이다. 식

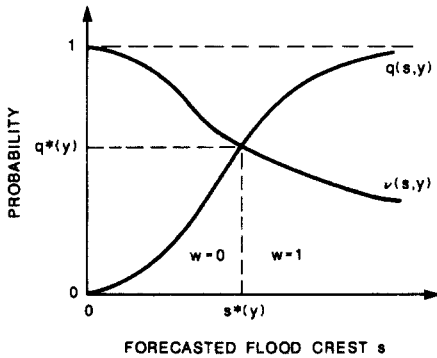


그림 5. 확률 $q(s,y)$ 와 $\nu(s,y)$ 의 단조변화 가정에 따른 최적의 예경보 방안 결정

(30)으로 표현되는 최적의 홍수예경보 방안이란 s^* 가 추정되고 대상지역(y)을 범람하는 사후확률 $q(s,y)$ 가 기준확률 $\nu(s,y)$ 를 초과할 경우에 예경보를 발령하자는 것이다. 이러한 기준은 단지 의사결정자의 선택에 따른 비효율성 차이의 비율에 의존하게 된다.

2) 단순 변화 가정에 따른 방안

그림 5와 같이 모든 y 에 대해 확률 $q(s,y)$ 는 s 에 대해 증가하고 반대로 확률 $\nu(s,y)$ 는 s 에 대해 감소한다고 가정하면, 하나의 유일한 기준 예측치 $s^*(y)$ 가 존재하여 식(33)이 얻어진다. $q^*(y) = q(s^*(y), y)$ 라 할 때, 최적의 경보발령에 대응하는 예측치의 집합인 $S^*(y)$ 은 식(34)와 같은 개구간이 된다. 이와 관련하여 그림 6.은 $m=1,2,3$ 으로 표현되는 3개의 구간에 대해 최적의 홍수예경보 방안을 설명하고 있다.

$$q(s^*(y), y) = \nu(s^*(y), y). \quad (33)$$

$$\begin{aligned} S^*(y) &= \{s : q(s,y) > q^*(y)\}, \\ &= \{s : s > s^*(y)\}. \end{aligned} \quad (34)$$

각 지역 표고 $y_m(m=1,2,3)$ 에 대해, 식(33)의 해는 기준 예측치 $s^*(y_m)$ 을 지정한다. (s,y) 직각 좌표계에서, $\{(y_m, s^*(y_m)) : m = 1,2,3\}$ 의 각 점들은 (s,y) 평면을 경보를 발령하지 않는($w=0$) 영역과 발령하는($w=1$) 영역으로 구분하는 다단계 함수를 나타낸다. 사전에

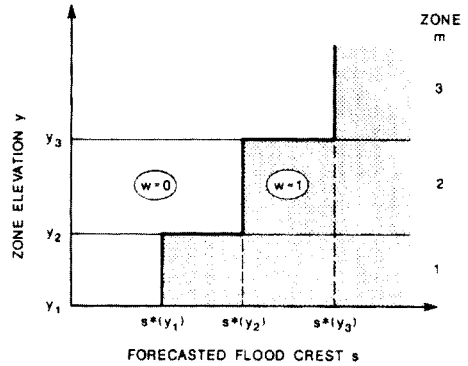


그림 6. 단순 변화 가정에 3개의 홍수터 구간에 대한 최적의 홍수예경보 결정 방안예

준비된 그림 6.을 이용하여 홍수시, 의사결정자는 분석시점에서 예측된 s 를 그림 6.에 표시하므로써 최적의 홍수예경보 발령 지역을 결정할 수 있을 것이다.

3) 연구 동향

최적의 홍수예경보 방안을 위한 노력은 2가지 방향으로 경주될 수 있다. 첫째, 일반 공공기관과 상업적 시설물의 관리자 등과 같이 다양한 경보수령자들을 위해 목적특성(purpose-specific)별 예경보가 이루어지는 것이 바람직하다. 이를 위해 각각의 예경보 수령자에게 적합한 비효율성 함수가 각각 마련되어야 한다. 각각의 함수를 추정하므로써 홍수 구간별 영역내에 존재하는 예경보 수령자의 특성에 맞는 각각의 최적기준 $s^*(y)$ 가 결정될 것이다.

둘째, 홍수발생전에 일련의 예측정보들이 갱신되는 과정에서 홍수주의보와 홍수경보로 구분되는 과정이라면, 홍수주의보의 발령유무와 홍수경보의 발령유무에 따라, 2가지의 최적기준 $s^*(y)$ 가 결정될 것이다.

이러한 2개의 독립된 일단계(single-stage) 모형의 장치는 다단계 결정모형에서 이용하고 있는 부분최적화(suboptimal)라는 결정전략(decision strategies)과 유사하다(Krzesztofowicz and Davis, 1983 a,b,c). 그러나 돌발홍수와 급변하는 하천홍수의 경우에는 짧은 선행예보시간과 빠른 홍수 진행으로 결정 단계의 수와 각 단계 상호간의 확률적인 종속성으로 인해 부분최적화의 효과는 작을 것이다.

3. 결론

본 기사에서는 Krzysztofowicz(1993)의 홍수예경보 이론을 일부 소개하였다. 계속되는 홍수예경보 이론은 홍수예경보의 수행능력에 대한 통계적인 측정방법과 실용적인 지표들에 관해 소개하고 있으나 본 기사에서는 이들을 생략하였다. 홍수감지에서 예경보의

결정단계까지 세밀하게 기술된 선진 연구사례를 통해 자연스럽게 우리의 홍수예경보를 되돌아 보지 않을 수 없다. 25년의 역사를 가진 국내 홍수예경보가 존재만으로도 이미 그 역할을 다했다고 볼 수는 없을 것이다. 따라서 홍수예경보에 바라는 우리의 기대수준을 제고할 필요가 있으며 그 꾸준한 노력에는 전문가의 철학이 담겨야 할 것이다. ●

〈참 고 문 헌〉

Ferrell, W.R., and Krzysztofowicz, R. (1983). "A model of human response to flood warnings for system evaluation." *Water Resour. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1467-1475.

Krzysztofowicz, R., and Davis, D.R. (1983a). "A Methodology for Evaluation of Flood Forecast-Response Systems 1. Analyses and Concepts." *Water Resour. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1423-1429.

Krzysztofowicz, R., and Davis, D.R. (1983b). "A Methodology for Evaluation of Flood Forecast-Response Systems 2. Theory." *Water Resour. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1431-1440.

Krzysztofowicz, R., and Davis, D.R. (1983c). "A Methodology for Evaluation of Flood Forecast-Response Systems 3. Case Studies." *Water Resour. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1441-1454.

Krzysztofowicz, R. (1993). "A theory of flood warning systems." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No. 12, pp. 3981-3994.

Pat -Cornell, M.E. (1986). "Warning system in risk management", *Risk Analysis*, 6(2), pp.223-234.