

# 유역 치수안전도를 위한 홍수피해잠재능의 개선

## Improving Potential Flood Damage for Basin Flood Mitigation Safety Level

이승종\*, 김영오\*\*, 이재형\*\*\*, 이윤영\*\*\*\*

Seung Jong Lee, Young-Oh Kim, Jae Hyung Lee, Yoon Young Lee

### 요 지

홍수피해잠재능(Potential Flood Damage: PFD)은 면 개념을 도입함으로써 치수단위구역의 치수특성 및 사회경제적인 가치를 함께 평가할 수 있도록 고안된 지수로 이미 여러 유역에서 시행되고 있는 유역종합 치수계획 사업에서 사용되고 있으나, 몇 가지 중요한 문제점이 꾸준히 제기되어 왔다. 본 연구에서는 우선 다음과 같은 이론적 문제점을 검토하였다. PFD는 처음 제안될 당시 (이하 기존 PFD) ‘잠재성’과 ‘위험성’라는 두 가지 요소가 곱해지는(multiplicative) 형태로 구성된 후 ‘위험성’ 요소 안에 ‘가능성’과 ‘방어능력’이 더해지는(additive) 형태를 취하고 있었다. 그러나 본 연구에서는 (이하 수정 PFD) ‘피해대상’, ‘피해가능성’, 그리고 ‘방어취약성’이 모두 곱해져야 이론적으로 타당함을 제시하였다. 기존 PFD는 ‘방어취약성’이 0의 값, 즉 홍수에 대한 완전방어를 의미하는 값에 가까워져도 PFD 값이 0에 수렴하지 않는 반면, 수정 PFD는 위의 경우 홍수 피해잠재능이 0에 수렴하는 것을 요소별 시나리오 모의를 통해서 확인할 수 있었다. 두 번째로 본 연구에서는 PFD를 이용하여 유역의 목표치수안전도 설정 방안을 제시하였다. PFD의 물리적인 의미가 무차원화 된 피해량 임을 전제로, 피해대상으로부터 목표방어율을 설정한 후 이에 해당하는 목표방어취약성을 계산하는 절차를 전개하였다. 추후 이 방법을 실제 자료에 적용하여 검증하는 연구가 이어져야 할 것이다.

**핵심용어:** 홍수피해잠재능, 치수안전도, 피해대상, 피해가능성, 방어취약성

### 1. 서 론

수자원장기종합계획(한국건설기술연구원, 2001)에서 처음 제시된 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage: PFD)은 종래의 치수사업에서 치중했던 선 개념에서 탈피하여 면 개념을 도입함으로써 공간적인 비교가 가능하고, 단위구역의 치수특성 및 사회경제적인 가치를 함께 평가할 수 있도록 고안된 지수이다. PFD는 이미 여러 유역에서 시행되고 있는 유역종합치수계획 사업에서 단위구역별 치수특성을 파악하고 단위구역 간의 치수 투자 우선순위를 산정하기 위한 판단지수로서 사용되고 있으나, 그 근간이 되는 이론적 타당성에 대한 문제가 꾸준히 제기되고 있는 것이 사실이다. 본 연구에서는 먼저 기 수행된 몇 개의 연구에서 제시된 PFD의 산정식을 처음부터 다시 짚어보고 그 개선방향을 제시하고자 한다.

PFD에 대한 또 다른 적용 가능성은 면 개념의 유역 치수안전도로 사용될 수 있는가이며, 이는 유역종합 치수계획 수립시 목표를 설정하는 중요한 가이드라인임에 틀림없으나 이에 대한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 이를 유역의 ‘목표치수안전도’로 칭하고 설정하는 방안을 제시하고자 한다.

\* 정회원 · (주)EPS solution 수자원부 대리 · E-mail: [bunkersj@dreamwiz.com](mailto:bunkersj@dreamwiz.com)

\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수 · E-mail: [yokim05@snu.ac.kr](mailto:yokim05@snu.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 현대엔지니어링(주) 수자원부 차장 · E-mail: [jhlee908@hec.co.kr](mailto:jhlee908@hec.co.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 현대엔지니어링(주) 수자원부 상무 · E-mail: [yylee@hec.co.kr](mailto:yylee@hec.co.kr)

## 2. 기존 PFD와 수정 PFD의 비교

본 연구에서는 수자원장기종합계획(한국건설기술연구원, 2001)에서 제시한 PFD를 기존 PFD로, 그리고 김영오와 김정훈(2003)에서 제안한 PFD를 수정 PFD로 칭하여 이 두 지수를 다음에 비교하였다.

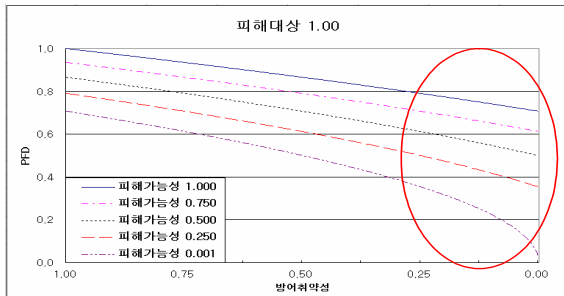
기존 PFD와 수정 PFD의 가장 큰 차이점은 표 1과 같다. 즉, 기존 PFD는 ‘잠재성’과 ‘위험성’이라는 두 가지 요소가 곱해지는(multiplicative) 형태로 구성된 후 ‘위험성’ 요소 안에 ‘가능성’과 ‘방어능력’이 더해지는(additive) 형태를 취하고 있으며, 수정 PFD는 ‘피해대상’, ‘피해가능성’, 그리고 ‘방어취약성’이 모두 곱해지는 형태로 구성되어 있다.

표 1. 기존 PFD와 수정 PFD의 요소 및 산정식 비교

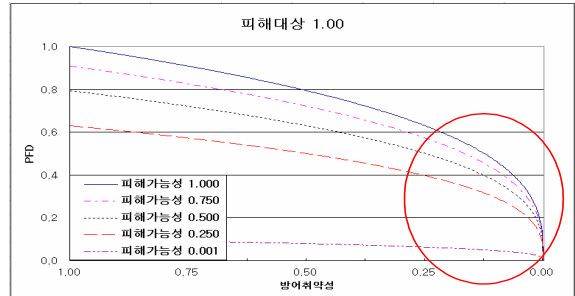
구분 \ PFD	기존 PFD		수정 PFD		
요소	잠재성, $F_{PO}$	위험성, $F_{RI}$ 가능성, $F_{POSS}$   방어능력, $F_{DEF}$	피해대상, $F_{PO}$	피해가능성, $F_{POSS}$	방어취약성, $F_{DEF}$
산정식	$PFD = F_{PO}^{\alpha_1} \times F_{RI}^{\alpha_2} = F_{PO}^{\alpha_1} \times (F_{POSS} + F_{DEF})^{\alpha_2}$		$PFD = F_{PO}^{\alpha_1} \times F_{POSS}^{\alpha_2} \times F_{DEF}^{\alpha_3}$		

주) 기존 PFD의  $\alpha_1, \alpha_2 = 1/2$ , 수정 PFD의  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 1/3$

두 지수의 타당성을 고찰하기 위해 본 연구에서는 모의실험을 수행하여 두 산정식의 차이가 홍수피해 잠재능 산정에 어떠한 영향을 미치는 가를 살펴보았다. 즉, ‘잠재성(피해대상)’, ‘가능성(피해가능성)’ 그리고 ‘방어능력(방어취약성)’ 각각의 요소에 모든 무차원 지수(0~1)를 적용하여 PFD를 산정해 보았으며, 모의결과 중 대표로 피해대상 1.00과 0.25의 경우에 대해서 그림 1 및 그림 2에 나타내었다.



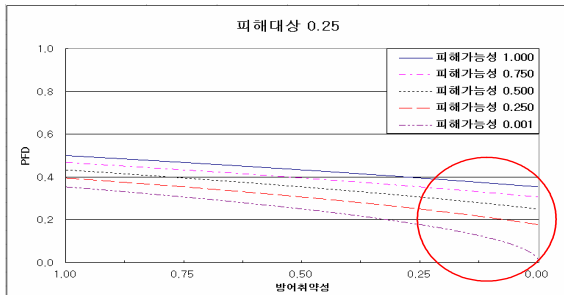
(a) 기존 PFD



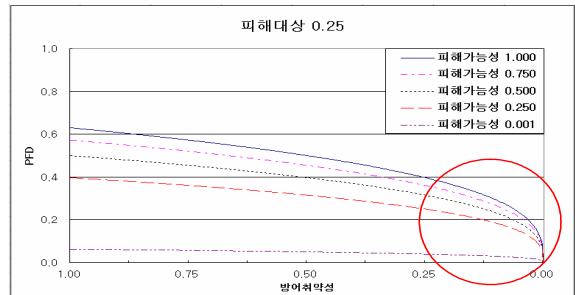
(b) 수정 PFD

그림 1. 시나리오별 기존 PFD 및 수정 PFD의 비교 - 피해대상 1.00

주) 기존 PFD와 수정 PFD의 각 요소명은 모두 피해대상, 피해가능성, 방어취약성으로 통일함



(a) 기존 PFD



(b) 수정 PFD

그림 2. 시나리오별 기존 PFD 및 수정 PFD의 비교 - 피해대상 0.25

다음과 같은 세 가지의 경우를 생각해 보자.

- 1) 홍수가 발생해도 치수단위구역에 피해를 입을 대상이 없는 경우('피해대상=0'을 의미),
- 2) 치수단위구역에 홍수가 발생될 가능성이 없는 경우('피해가능성=0'을 의미)
- 3) 치수단위구역이 홍수피해에 대해 완벽한 방어시설물을 구축하고 있는 경우('방어취약성=0'을 의미)

만약 어느 치수단위구역이 위의 세 가지의 경우 중 하나라도 포함된다면 그 지역의 홍수피해잠재능은 없다고('PFD=0'을 의미) 할 수 있을 것이다. 왜냐하면, 1)을 포함하는 지역의 경우 홍수가 발생해도 홍수에 의한 피해가 없으며, 2)나 3)을 포함하는 지역의 경우에는 이론적으로 홍수가 발생하지 않기 때문이다.

본 연구에서 수행한 시나리오 모의결과 기존 PFD는 '가능성'이나 '방어능력'이 0의 값, 즉 홍수가 발생될 가능성이 없거나 홍수에 대한 완전방어를 의미하는 값에 가까워져도 홍수피해잠재능이 0에 수렴하지 않는 반면, 수정 PFD는 위의 경우 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 기존 PFD가 0에 수렴하지 않는 이유는 '가능성'과 '방어능력'을 더해주기 때문에 이들 중 하나만 0의 값을 가질 경우에는 '위험성'이 크게 낮아지지 않아 홍수 피해잠재능도 낮게 산정되지 않기 때문이다. 즉, 기존 PFD는 '잠재성'이 0의 값을 갖거나 '가능성'과 '방어능력'이 모두 0의 값을 가질 경우에만 홍수피해잠재능이 0으로 수렴하게 된다. 반면에, 수정 PFD는 세 개의 요소들을 모두 곱해주기 때문에 세 요소 중 하나만 0의 값을 가져도 홍수피해잠재능이 0으로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 홍수피해잠재능을 정확히 산정하기 위해서는 '잠재성(피해대상)', '가능성(피해가능성)'과 '방어능력(방어취약성)'을 모두 곱해줘서 PFD를 산정하는 수정 PFD가 기존 PFD 보다 이론적으로 타당하다고 사료된다.

### 3. 유역 치수안전도를 위한 홍수피해잠재능의 개선방안

치수안전도는 “치수단위구역에 현존하거나 장래에 존재하게 될 인명, 자산, 사회기반시설, 그리고 자연·문화·사회·경제 자원 등을 홍수로부터 방어하거나 피해를 저감할 수 있도록 설정한 기준 안전율”로 정의할 수 있다(한국건설기술연구원, 2001). 지금까지 우리나라는 하천등급에 따라 홍수방어시설물의 설계빈도를 제시하는 치수안전도를 제공해왔으나, 유역단위의 면 개념 치수안전도를 빈도로 표현하기에는 한계가 있음이 분명하다. 따라서, 본 연구에서는 빈도개념의 치수안전도 대신 방어율(%) 개념을 도입하여 유역의 목표치수안전도를 산정하는 방안에 대하여 제시하고자 한다.

#### 3.1 기본 가정

지금까지 PFD는 0에서 1 사이의 값을 가지는 어떤 물리적 의미도 없는 단순한 지수로 해석되어왔다. 하지만 홍수피해잠재능이란 이름이 나타내듯이 PFD는 피해지수여야 하며 인명과 자산을 모두 포함하는 피해량을 나타내야 한다. 따라서, 피해지수  $w$ 를 무차원화 된 피해량이라 정의하면 피해지수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \text{PFD} = x^{\alpha_1} \times y^{\alpha_2} \times z^{\alpha_3} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,  $w, x, y, z$ 는 각각 피해량, 피해대상, 피해가능성, 방어취약성을 의미하며,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 은 요소별 가중계수를 의미한다. 즉 피해대상  $x$ 는 하중(load)을 의미하는 피해가능성과 저항(resistance)를 의미하는 (홍수방어시설물의) 방어취약성의 복합작용에 의하여 피해량  $w$ 으로 변환된다. 이러한 피해량  $w$ 는 해당 치수단위구역의 피해대상  $x$ 보다 항상 작아야 한다. 즉

$$0 \leq w \leq x \leq 1$$

의 관계가 성립해야 하나,  $\alpha_1 = 1$ 로 설정하고  $y, z, \alpha_2, \alpha_3$  를 모두  $[0,1]$ 의 구간으로 유지하면 이를 만족할 수 있다.

### 3.2 피해지수 $w$ 의 산정방법

피해지수  $w$ 의 산정은 요소별 가중계수  $\alpha_i$ 의 결정방법 외에는 기존의 PFD 산정방법과 동일하다. 기존 및 수정 PFD는 요소별 가중계수  $\alpha_i$ 에 각각 1/2 및 1/3의 동등한 값을 부여하여 PFD를 산정하였다. 하지만  $\alpha_i$ 는 피해지수  $w$ 에 영향을 가장 크게 미치는 매개변수이므로 이의 정확한 산정은 매우 중요하며, 원론적으로 반드시 가용한 자료를 통해 추정되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로  $\alpha_i$ 를 산정하는 방법을 제시한다.

- ① 피해기록이 존재하는 구역에 대한 피해자료(인명피해, 재산피해 등)를 가능한 모두 구하고 이를 피해대상  $x$ 를 구하는 방식과 동일하게 적용하여 무차원화 된 실제 피해지수  $w$ 를 산정한다.
- ②  $x, y, z$ 를 구성하는 모든 세부요소들과  $w$ 의 상관관계를 분석하여, 이들 세부요소들 중에 중요 변수만을 선정하여  $x, y, z$ 를 재구성한다.
- ③ 식 (1)의 양변에 대수변환을 취하여 다음의 식 (2)와 같은 선형회귀방정식을 만들고 ①에서 산정한  $w$ 와 ②를 통해 재산정한  $x, y, z$ 를 대입하여 회귀분석 이론으로  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 을 추정한다.

$$\ln w = \alpha_1 (\ln x) + \alpha_2 (\ln y) + \alpha_3 (\ln z) \quad \text{식 (2)}$$

- ④ 이 때  $y$ 에 입력되는 강우 자료와  $z$ 에 입력되는 홍수방어시설물 자료는 피해 당시의 자료를 사용한다.

### 3.3 목표 치수안전도의 산정

식 (1)을 이용하면 방어율  $p_T$ 는 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_T = 1 - w/x = 1 - x^{\alpha_1 - 1} \times y^{\alpha_2} \times z^{\alpha_3} \quad \text{식 (3)}$$

여기서,  $w/x$ 는 치수단위구역의 피해율을 의미하며, 반대로  $(1 - w/x)$ 는 방어율을 의미한다. 따라서, (목표)방어율  $p_T$ 를 유지하기 위한 (홍수시설물의) 방어취약도  $z_T$ 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$z_T = \left\{ \frac{1 - p_T}{x^{\alpha_1 - 1} \times y^{\alpha_2}} \right\}^{\frac{1}{\alpha_3}} \quad \text{식 (4)}$$

본 연구에서는 각 치수단위구역의 피해대상  $x$ 에 해당하는 목표방어율  $p_T$ 를 다음의 표 2와 같이 정의하고, 이를 이용하여 ‘목표 치수안전도’를 산정하는 방안을 제시하고자 한다.

표 2. 치수단위구역의 피해대상  $x$ 에 대한 목표방어율  $p_T$

피해대상 $x$ 의 범위	목표방어율( $p_T$ )	초과확률 개념	빈도 개념
0.90 ~ 1.00	99.8%	0.2%	500년
0.75 ~ 0.90	99.5%	0.5%	200년
0.50 ~ 0.75	99.0%	1.0%	100년
0.25 ~ 0.50	98.0%	2.0%	50년
0.20 미만	96.0%	4.0%	25년

치수단위구역이 목표치수안전도인 목표방어율에 도달하려면 홍수방어시설물의 건설을 통하여 방어취약도가 개선되어야 하며, 이때의 방어취약도  $z_T$ 는 식 (4)를 이용하여 산정될 수 있다. 즉, 치수단위구역의 피해대상  $x$ 에 해당하는 목표방어율  $p_T$ 를 식 (4)에 대입하여 산정된  $z_T$ 가 목표방어율에 해당하는 목표방어취약도가 되며 유역종합치수계획에서는 현재 방어취약도( $z$ )를 목표방어취약도( $z_T$ )로 하향시켜야 한다.

#### 4. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 기존의 홍수피해잠재능 평가방법들 중 기존 PFD와 수정 PFD를 비교하고, 시나리오 모의를 수행하여 이론적인 타당성을 검토하였다. 검토결과 ‘잠재성’과 ‘위험성’라는 두 가지 요소가 곱해지는 형태로 구성된 후 ‘위험성’ 요소 안에 ‘가능성’과 ‘방어능력’이 더해지는 형태를 취하는 기존 PFD 보다 ‘피해대상’, ‘피해가능성’과 ‘방어취약성’을 모두 곱해서 PFD를 산정하는 수정 PFD가 이론적으로 타당한 것을 제시하였다. 또한 PFD를 이용하여 유역의 목표치수안전도를 설정하는 새로운 방안을 제시하였으나 추후 실제 자료를 사용하여 이를 검증하는 연구가 이어져야 할 것이다. 본 연구 표 2에서 제시한 피해대상  $x$ 에 해당하는 목표방어율 값은 국토계획에 매우 큰 영향을 줄 수 있으므로 공론화 과정을 거쳐 정착되어야 하며, 특히  $x$  범위의 구분은 전국에 대한  $x$  값을 철저히 조사하고 적절한 범위를 설정하는 연구가 국가 주도하에 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 현대엔지니어링(주)의 유역종합치수계획의 요소기술 개발/ PFD 평가방법의 개선 및 활용 과제와 서울대/한양대 사회기반 및 건설기술 인력 양성사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. 김정훈, 김영오 (2003). “홍수피해잠재능 개선방안.” 2003년 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2373-2378.
2. 한국건설기술연구원 (2001). 수자원장기종합계획(2001 ~ 2021). 연구보고서, 건설교통부.