

ORIGINAL ARTICLE

## 라그랑지안 입자 추적기법을 이용한 홍수조절용댐 내 부유쓰레기 거동 모의에 관한 연구

장석환 · 오경두<sup>1)\*</sup> · 오지환<sup>2)</sup>

대전대학교 건설시스템공학과, <sup>1)</sup>육군사관학교 토목환경학과, <sup>2)</sup>대전대학교 토목환경공학과

## A Study on the Behavior of Floating Debris in a Flood Control Dam Using the Lagrangian Particle Tracking Method

Suk-Hwan Jang, Kyoung-Doo Oh<sup>1)\*</sup>, Ji-Hwan Oh<sup>2)</sup>

Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea

<sup>1)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy, Seoul 01815, Korea

<sup>2)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea

### Abstract

After large-scale flooding damage occurred along the Imjin river in 1996, 1998, and 1999, the Hantan river flood control dam was planned, and it has since been under construction. Unlike existing dams in Korea, the Hantan river flood control dam will remain fully open except during high floods, when the dam will store flood water temporarily to reduce flood peaks and flood water volume downstream.

During past flooding seasons, floating debris has caused difficulties in the management of large-scale dams. Most of the existing multipurpose dams in Korea have installed nets to collect floating debris based on many years of experience with and data about inflow and distribution of floating debris in the dams. For the Hantan river flood control dam, however, collection of data about inflow and distribution of floating debris is not possible as the dam is located near the border area between North and South Korea.

In order to devise a preliminary plan to collect floating debris in the Hantan river flood control dam, an EFDC hydrodynamic model was used to analyze the behavior of floating debris during high floods. The Lagrangian particle tracking method was utilized to simulate the behavior of floating debris in the dam. Based on the analysis of paths and final destinations of the particles, seven collection points were selected where it seemed to be effective to collect floating debris, as debris is likely to accumulate there in high density.

**Key words** : Floating debris, Lagrangian particle tracking, Hantan flood control dam

### 1. 서론

본 연구의 대상인 한탄강 유역은 북한과의 접경지

역에 속하는 유역으로서 과거 1996년, 1998년, 1999년 등 태풍 발생에 따른 집중호우의 영향으로 큰 홍수 피해 이력이 있으며(K-water, 2014), 이를 극복하고자

Received 19 July, 2016; Revised 5 September, 2016;

Accepted 21 September, 2016

\*Corresponding author : Kyoung-Doo Oh, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Military Academy, Seoul 01815, Korea

Phone : +82-2-2197-2857

E-mail : okd0629@hanmail.net

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

홍수 조절을 주목적으로 한탄강 홍수조절댐(이하 한탄강댐)을 건설 중에 있다. 한탄강댐은 홍수조절만을 위한 홍수전용 댐으로 평상시는 수문 운영과 관계없이 모두 개방하여 일반적인 자연하천과 같기 때문에 하천의 연속성을 일부 만족하며 일정 빈도 이상의 홍수가 발생할 경우, 일시적으로 물을 저장하여 홍수량을 지체시키는 역할을 한다(Jang, 2014). 이와 같은 홍수전용 댐을 미국에서는 “Dry dam”이라고 칭하고, 유럽에서는 “Flood Retention Basin”, 일본에서는 “Instream Flood Control Dam”, 이 외 다른 나라에서는 “Flood Mitigation Dam” 이라고 칭한다(Sumi, 2008). 댐은 하도 직강화, 하상재료 조립화, 댐 하류부 하천의 자연적인 유사 패턴과 흐름을 바꿔 침식과 퇴적을 야기하고, 하천생태계를 방해하는 작용 등 단점이 존재하나 홍수 완화에만 전념하는 목적인 홍수조절 댐은 평상시 자연하도 형태를 유지하기 때문에 “미래 댐은 홍수 완화에 전념하는 댐이 환경적으로 매우 긍정적일 수 있다”라고 제시된 바 있다(Lempérière, 2006). 댐의 유지관리 및 운영 측면에서 유역에서 발생하여 유입되는 부유쓰레기의 적절한 수거와 차단은 매우 중요한 문제인데, 기존 일반적인 다목적댐은 유

입되는 부유쓰레기를 차단하기 위하여 댐 상류부에 차단망을 설치하여 선 차단하여 유지관리를 실시하고 (Park et al., 2005), 홍수기 이후 선박으로 이를 수거하여 재활용, 소각 등으로 처리하는 시스템으로 연간 부유쓰레기의 분포와 양 등을 정량적으로 분석하여 관리가 가능하다. 그러나 본 연구 대상 유역의 상류는 접경지역으로 접근이 불가하고, 댐의 역할 상 평저수시와 홍수기시의 수위 변화 폭이 매우 크고, 비 홍수기시는 대규모 홍수터가 드러나며, 지형 특성상 구릉지대와 협곡으로 대부분 접근이 불가하여 정량적인 부유쓰레기의 분포와 양 등을 판단하기 매우 어려운 조건이다. 연구동향을 살펴보면 퇴적물, 부유쓰레기, 부유사 확산 등의 관한 연구는 Jung and Hwang(2003)은 퇴적물 수송과정을 모의할 수 있는 2차원 모형을 수립하여 유입되는 입자성 오염물질의 이동경로를 파악하기 위한 모델링을 실시하였고, Heo(2008)는 EFDC 모형을 이용하여 시화호의 현상태와 시화호 조력발전소가동 후의 퇴적물 변화를 검토하여 저수지로 유입되는 퇴사 거동 분포를 예측하였고, Lee(2011)는 영종도 인근 해역의 해수거동과 공사 시 유출되는 부유사의 확산정도를 모의하기 위하여 토사유출형태에 따른

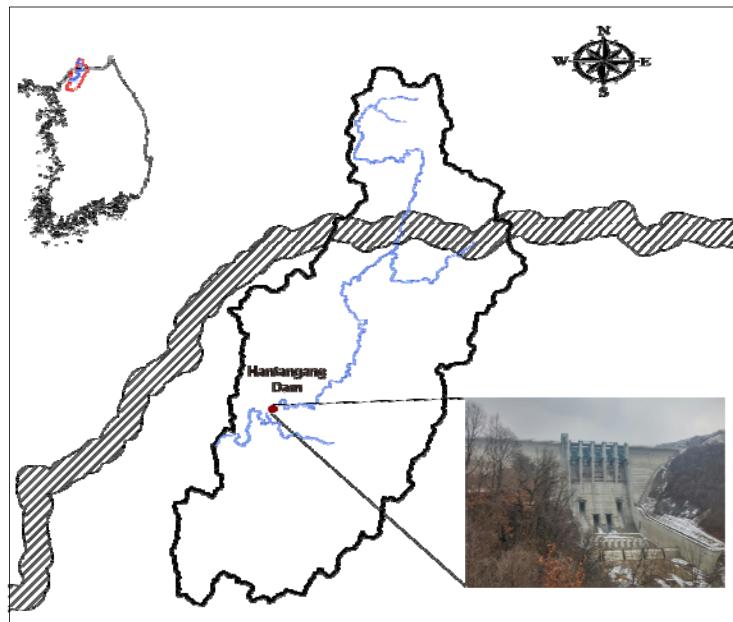


Fig. 1. Study area.

3가지 조건에 따라 EFDC 모형을 적용하여 수치모의를 실시하였다. Choi(2012)는 EFDC 모형을 이용하여 목포해역의 점착성 퇴적물 이동 모의를 실시하였고, Bang(2013)은 연산강 하구를 대상으로 하구둑 운영에 의한 하구 퇴적물 이동양상과 수치를 파악하기 위한 EFDC 모형의 퇴적물 이동 모의를 실시하였다. Kim(2014)은 금강하구역의 부유사 변동과 퇴적물의 상호연관성을 정량적으로 평가하고 퇴적물 분포 및 이동 패턴 특성을 제시하고자 하여 EFDC 모형을 적용한 퇴적물 이동 수치모의를 실시한 바 있다.

본 연구에서는 댐의 유지관리를 위하여 한탄강댐 유역의 부유쓰레기의 유입과 무작위적 분포와 더불어 홍수가 발생 할 경우 하도의 특성에 따른 이동 경로와 궤적, 유수 흐름의 정체구역 등 부유쓰레기의 고착될 가능성이 높은 지점 등을 분석하여 최종적으로 부유쓰레기의 효과적인 처리방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 HEC-HMS 모형으로 한탄강 본류의 홍수량 분석을 실시하고, 각 지류의 홍수량은 Vflo™ 분포형 모형을 활용하여 산정하였다. 또한 한탄강 댐의 수위, 홍수량 조건을 고려한 3차원 동수역학적 모형인 EFDC 모델을 구축하여 비교적 홍수빈도가 잦을 것으로 예상되는 소·중규모 빈도를 중심으로 부유물 유동 모의를 실시하였다. 그리고 본 연구 결과를 토대로 효과적인 부유쓰레기 처리방안을 위한 최적의 적치장 위치를 선정하였다. 다음 Fig. 1은 연구 대상 지역 및

한탄강댐의 전경을 보여주고 있다.

## 2. 모형의 개요

EFDC (the environmental fluid dynamics code)는 미국 버지니아 해양연구소(VIMS)에서 Hamrick에 의해 1988년 처음 개발된 소스코드가 공개된 지표수 모델링 시스템이다. EFDC 모형은 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질 수송, 냉·온수 배출해석을 모의하는 3차원 수치모형으로 동수역학을 포함하여 다양한 수체에 환경 평가와 관리를 위해 개발되었다(Hamrick, 1992). EFDC 모델은 연속방정식(1)과 수평방향 운동량 보존 방정식(2)~(3), 정역학 방정식(4), 수심적분 연속방정식(5) 으로 구성되어 있다.

여기서,  $u$ 와  $v$ 는 각각 곡선-직교 좌표계의  $x$ ,  $y$ 방향에서 수평속도성분이다.  $m_x$ 와  $m_y$ 는 매트릭 텐서의 대각선분의 제곱근이며  $m = m_x m_y$ 은 매트릭 텐서의 자코비안(Jacobian)이다. 전체수심은 수직 좌표계의 원점  $z^* = 0$ 에 대한 수심과 자유수면의 변위의 합으로  $H = h + \zeta$ 으로 표현된다. 운동량 보존 방정식에서 압력  $p$ 는 기준 밀도에 의한 정수압  $\rho_o g H(1 - z)$ 의 초과압력을 기준밀도  $\rho_o$ 로 나눈 값이다.  $\rho_o$ 는 기준밀도이고  $\rho$ 는 실제 물의 밀도이다.  $f$ 는 Coriolis 매개변수이고  $A_v$ 는 수직방향 난류에 의한 와점성계수이며,  $Q_u$ 와  $Q_v$ 는 운동량의 생성-소멸항이다.

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) + \partial_z(mw) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \partial_t(mHu) + \partial_x(m_y H u u) + \partial_y(m_x H v u) + \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv \\ = -m_y H \partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v \partial_z u) + Q_u \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \partial_t(mHv) + \partial_x(m_y H u v) + \partial_y(m_x H v v) + \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu \\ = -m_x H \partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_y H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v \partial_z v) + Q_v \end{aligned} \tag{3}$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_o)\rho_o^{-1} = -gHb \tag{4}$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y H u) + \partial_y(m_x H v) + \partial_z(mw) = 0 \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \partial_t(m_x m_y H C) + \partial_x(m_y H u C) + \partial_y(m_x H v C) + \partial_z(m_x m_y w C) - \partial_z(m_x m_y w_{sc} C) \\ = \partial_x\left(\frac{m_y}{m_x} H K_H \partial_x C\right) + \partial_y\left(\frac{m_x}{m_y} H K_H \partial_y C\right) + \partial_z\left(m_x m_y \frac{K_v}{H} \partial_z C\right) + Q_c \end{aligned} \tag{6}$$

$$S_c = S_E - S_D \tag{7}$$

EFDC 모형은 유체의 이동과 염분, 수온 및 오염물질의 이송은 물론 본 연구와 같은 유류 누출, 쓰레기와 같은 부유물질이나 독성 용존물질에 대한 Eulerian 및 Lagrangian 이송방정식의 해석도 가능하다. 수질모형은 조류를 포함한 부영양화 과정을 모의할 수 있으며 점착성 및 비점착성 유사의 이동과 하상 및 해저의 세굴-퇴적량을 계산하여 세굴-퇴적고의 변화에 따른 하상변동을 모의할 수 있다. 퇴적물을 포함한 물질보존 방정식(6), 부유물질의 재부유와 퇴적에 관한 관계식(7) 등으로 구성되어 있다.

여기서,  $C$ 는 물질의 농도,  $w_{sc}$ 는 침강속도,  $K_D$ ,  $K_v$ 는 수평/수직 난류확산계수를 나타내며  $S_E$ 는 단위시간, 단위면적당 저면으로부터의 재부유량,  $S_D$ 는 단위시간, 단위면적당 저면으로의 퇴적량으로 구성되어 있다.

### 3. 홍수량 분석

#### 3.1. 본류 홍수량 분석

한탄강 본류의 홍수량 분석에 적용한 모형은 HEC-HMS으로 모형 내 Clark 합성단위도법을 활용하였다. Fig. 2는 본 연구에서는 3개의 소유역과 1개의 하도, 1개의 저수지 및 1개의 싱크(sink)로 유역 모형을 구성한 모식도를 보여주고 있다. K-Water(2008)의 빈도별 48시간 강우량, 저수지의 수위-수면적 곡선과, 수위-방류량 곡선을 포함한 유역면적, 도달시간,

유출곡선지수(CN) 자료를 참고하여 분석하였으며, 저류상수를 결정하기 위한 Peters 공식에서 하천경사가 완만하며 저류능력이 큰 유역의 하한값인  $M=0.6$ 을 적용하여  $K=1.5t_c$ 로 가정하였다. 하도추적은 Muskingum 기법에 의해 수행했으며 기중인자  $x$ 는 0.2로 가정하였다. 유역과 유출에 대한 매개변수는 다음 Table 1과 같다.

다음 Table 2는 모형의 구축과 각 빈도에 따른 홍수량에 대해 한탄강댐의 홍수조절을 모의하여 홍수 추적한 결과를 나타낸다. 25년 빈도 이상의 홍수에 대해서는 댐의 조절방류가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 본 결과를 부유쓰레기 거동 모의를 위한 본류의 홍수량으로 채택하여 상류 경제조건으로 활용하였다.

#### 3.2. 지류 홍수량 분석

한탄강댐 홍수터는 본류 외에도 20여개의 지류가 유입되어 매우 복잡한 수리-수문학적 시스템을 구성하고 있다. 한탄강 홍수터로 유입되는 지류들은 아직까지 홍수량을 별도로 산정된 바 없으며 본류에 비해 양 자체는 미미하지만 지류와 본류 합류부의 유량이 지속적으로 주어지지 않을 경우, 사수역 효과가 과도하게 나타나 유수의 흐름과 부유쓰레기 유동에 상당한 영향을 줄 것으로 예상된다. 그러나 지류들은 대부분 유역 면적이 매우 작아 본류 홍수량 산정에 적용한 Clark 합성단위도법을 적용하기에 적합하지 않다고

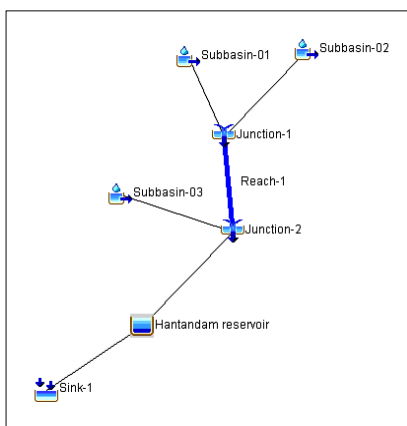


Fig. 2. Schematic of HEC-HMS basin model.

Table 1. Hydrologic parameters of HEC-HMS model

Classification	Subbasin			Reach
	01	02	03	Reach-1
Area (km <sup>2</sup> )	403.8	414.4	467.5	-
Time of concentration $t_c$ (hr)	6.46	4.20	6.32	-
Storage coefficient $K$ (hr)	9.69	6.30	9.48	6.95
Curve number (CN)	82	79	82	-

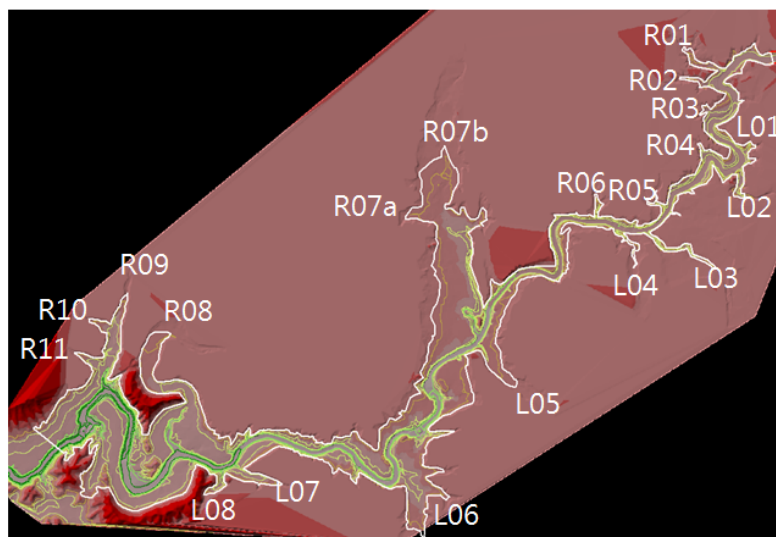
**Table 2.** Result of flood routing in a Hantan flood control dam

Frequency	Control volume (million m <sup>3</sup> )	Maximum water surface elevation (EL.m)	Peak-inflow rate (m <sup>3</sup> /s)	Peak-outflow rate (m <sup>3</sup> /s)
2	14.2	68.0	1,549	1,401
5	28.6	77.4	2,242	1,839
25	104	98.3	3,780	1,950
50	151	104.3	4,483	1,950
100	202	109.0	5,186	1,950
200	255	113.0	5,890	1,950

판단하였고, 기존의 개념적-경험적 모형으로 홍수량 산정의 신뢰성을 확보하기가 어려운 지류(미계측 소규모 유역)들에 대하여 비교적 적용성이 높은 것으로 알려진 분포형 모형 Vflo™을 활용하여 홍수량을 산정하였다. Vflo™ 모형은 미국의 Vieux & Associates Inc.사에서 개발한 홍수량 산정 모형으로서 일반적인 설계우량주상도는 물론 레이더 강우 시스템과 GIS 기반 수문 모의 솔루션을 제공하는 물리적 인자 기반의 분포형 모형(PBDM, physics-based distributed model)이다(Oh, 2009). Fig. 3은 한탄강댐 지류의 홍수량 산정을 위한 지점을 나타내며 기준은 유역 면적이 0.1 km<sup>2</sup> 이상인 지점으로 선정하였다. 그 결과는 한탄강댐 우안을 따라 12개 지점, 좌안을 따라 8개 지점 등 총

20개 지점으로서 홍수량을 산정하고 이를 지류의 경계조건으로 활용하고자 하였다.

지류는 유역 면적이 작고, 도달시간이 본류에 비해 매우 짧아 침투홍수량이 한탄강댐 본류 홍수의 침투가 발생하는 시점과 일치할 가능성이 매우 낮을 뿐만 아니라 지류의 임계지속기간이 지나고 나면 홍수량이 매우 과소해져서 정작 한탄강 본류의 부유쓰레기 유동이 중요한 시점에는 지류의 영향이 과소하게 반영될 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본류 유입량에 상관없이 지류의 유입량에 대해서는 일정한 값을 적용하고자 하천의 세굴과 퇴적, 하도의 형성 등에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려진 만제유량(bankfull discharge)을 적용하였다.



**Fig. 3.** Locations for inflow routing in the Hantan flood control dam.

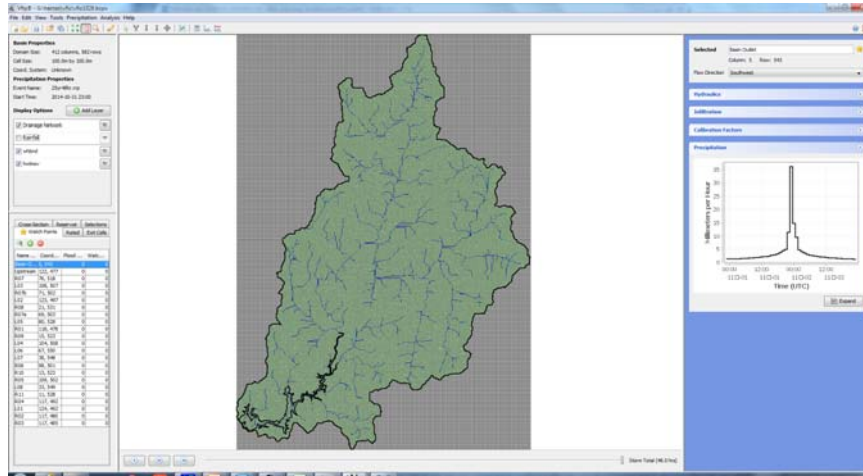


Fig. 4. Vflo™ model for the Hantan flood control dam basin.

먼저, 모형을 구축하기 위하여 한탄강댐 유역의 수치 고도모형(DEM), 경사도, 토지피복도(land cover), 토지이용도(land use) 등을 구축하여 매개변수를 산정하였다(Oh, 2009). 또한 빈도별 강우는 분류 홍수량 분석과 같은 강우량으로 채택하였다. Fig. 4는 한탄강댐 유역에 대해 구축된 Vflo™ 모형으로서, 가로와 세로가 각각 100 m인 정사각형 격자 120,375개로 구성하였다.

다음 Table 3은 한탄강댐 지류의 경계조건의 설정

을 위한 만제유량을 모의한 결과를 정리하여 제시하였다.

#### 4. 수치모형의 적용 및 결과

##### 4.1. EFDC 모형의 구축

EFDC 모형의 메쉬는 한탄강댐으로부터 상류방향으로 유로연장 약 22.3 km구간(용화천 합류점)으로 Fig. 5(a)와 같이 곡선-직교 좌표계의 매쉬(curvilinear

Table 3. Bankfull discharges in tributaries of Hantan river flood control dam

Right site	Area (km <sup>2</sup> )	Bankfull discharge (m <sup>3</sup> /s)	Left site	Area (km <sup>2</sup> )	Bankfull discharge (m <sup>3</sup> /s)
R01	4.70	9.11	L01	0.20	0.43
R02	0.14	0.46	L02	13.56	19.67
R03	0.14	0.46	L03	40.36	54.94
R04	0.23	0.70	L04	3.81	8.44
R05	1.34	3.23	L05	6.72	14.13
R06	1.65	5.10	L06	3.08	6.77
R07a	8.65	13.78	L07	2.31	6.46
R07b	32.15	40.31	L08	0.96	2.92
R08	12.88	21.08			
R09	4.69	9.97			
R10	1.56	5.02			
R11	0.78	2.64			

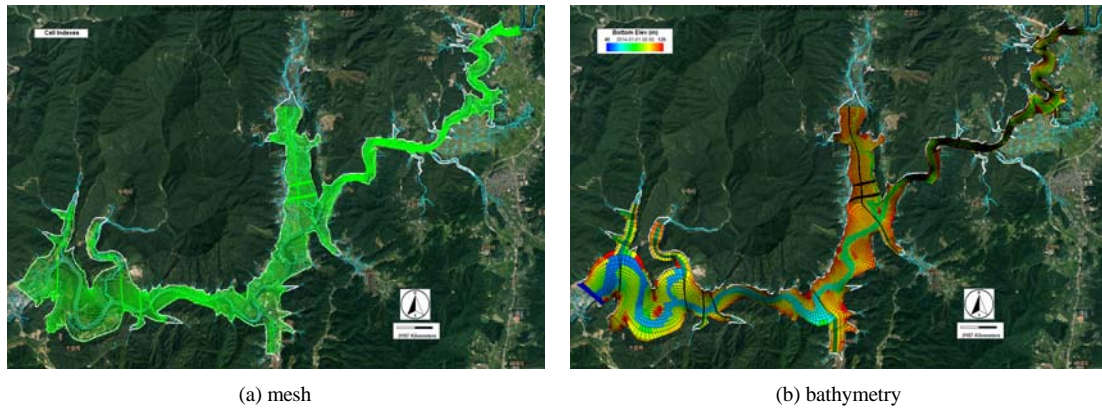


Fig. 5. Mesh and bathymetry of EFDC model for the Hantan river flood control dam.

mesh)로 구성하였다. 20여개에 이르는 한탄강댐의 주요 지천들이 묘사되도록 매쉬를 구성하였으며 매쉬의 셀 수는 총 15,485개로 구성하였고, 수치지도를 이용하여 한탄강댐의 하상표고(bathymetry)를 Fig. 5(b)와 같이 구성하였다.

4.2. 부유쓰레기 입력 조건

한탄강 상류부는 접경지역으로 접근이 불가하고, 남한 내 본류 하도는 급류하천으로 협곡이 형성되어 대부분 접근이 불가능하여 하도 내의 부유쓰레기 유입 및 형성 조건, 부유쓰레기의 양과 분포 등 조사된 기록이 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부유쓰레기의 정량적인 양보다는 부유쓰레기가 수면에 분포 하고 있는 경우와 홍수와 함께 유입될 경우의 하도의 수리적인 흐름 현상에 따라 높은 밀도로 고착될 가능성이 높은 지점을 선정하는데 연구의 주 목적을 두었다.

이에 따라 부유쓰레기의 유입량과 재부상 등 입력 자료의 불확실성으로 인하여 실제 부유쓰레기가 분포할 수 있는 수역인데 분포하지 않는 것으로 검토되어 취약지역에서 배제될 수 있는 가능성이 있는 점을 감안하여 시나리오를 2개로 구분하였다. 모의 시나리오 1은 홍수 이전, 홍수 중 수위상승기, 홍수 중 수위 하강기로 구분하여 부유쓰레기가 지류와 본류에서 다른 조건으로 유입되고 일부는 본류에서 재부상하는 조건을 설정하였고, 부유물의 입자 수는 참고할 만한 자료가 전무하여 유역 면적비를 고려하였다. 모의 시나리오 2는 홍수 기간 중 댐 수위가 최고수위에 도달한 시점에서 댐 수위와 동일한 수면에 부유쓰레기가 무작위적으로 분포하고 있다는 가정하에 수위의 하강과 더불어 댐에서 빠져나가거나 고착되는 과정을 모의하고자 하였다. 모의 시나리오에 따라 구성한 부유쓰레기 모의 가정 조건을 정리하면 Table 4와 같으며, 모의 시나리오 2에 대한 초기 부유쓰레기 분포

Table 4. Simulation conditions of floating debris in the Hantan river flood control dam

Flood frequency (yr)	Period of simulation (hr)	Number of input particle deposition				
		Scenario 1				Scenario 2
		Before to inflow flood	Increase to inflow flood	Decrease to inflow flood	Total	
2	27	200	400	100	700	660
5	36	200	400	175	775	1,010
25	55	200	600	225	825	1,660

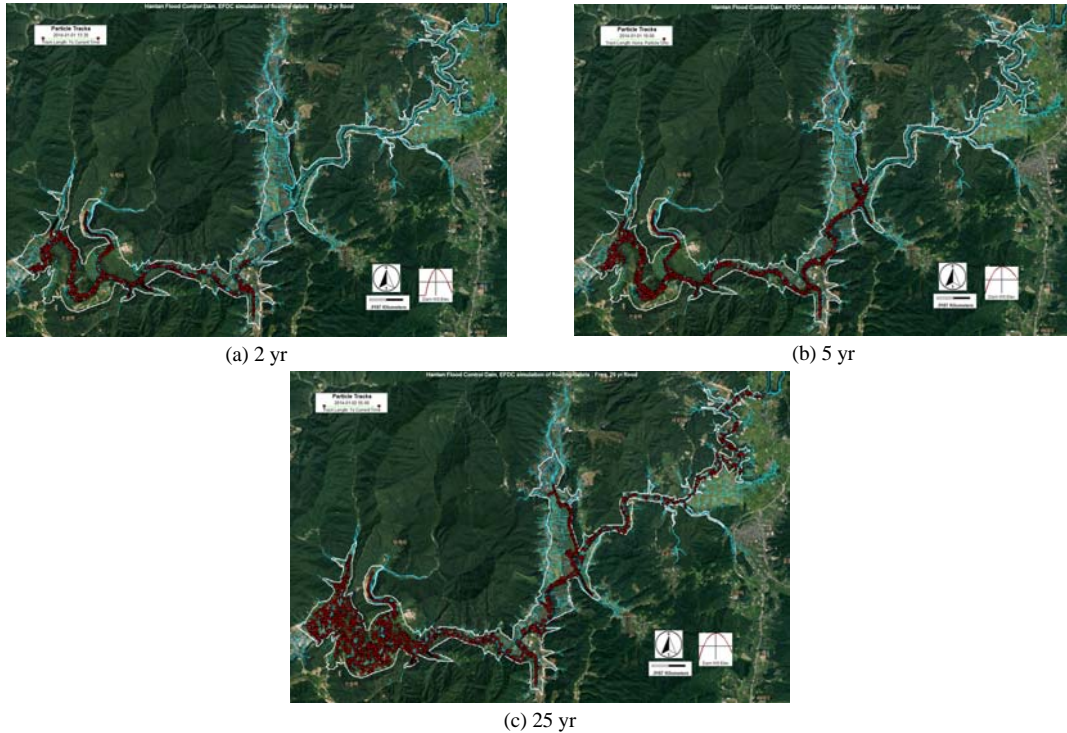


Fig. 6. Initial distribution of floating debris at maximum water surface elevation.

의 예는 다음 Fig. 6과 같다. 적색 삼각형 점들이 모형 내에서 부유쓰레기를 나타내고 있다.

#### 4.3. 부유쓰레기 유동 모의 결과

연녹색 선은 부유쓰레기가 거동한 궤적을 나타낸 것이며, 모의 시나리오 2의 경우는 궤적을 제거하여 부유쓰레기가 고착되는 구간이 잘 보일 수 있도록 구분하였다.

##### 4.3.1. 모의시나리오에 따른 홍수별 부유쓰레기 유동 모의 결과(전체구간)

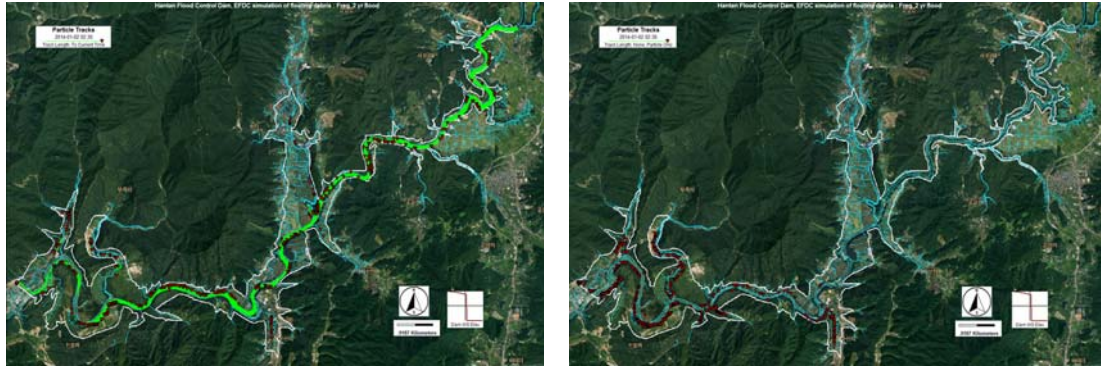
모의시나리오에 따른 홍수별로 홍수가 종료된 후 고착된 상태의 부유쓰레기 분포를 나타낸 그림은 Fig. 7~Fig. 9와 같다. 시나리오 별로 비교할 경우, 부유쓰레기의 밀도가 약간 다른 것처럼 보이지만 집중적으로 분포하는 양상과 지점은 흐름 특성에 가장 큰 영향을 받기 때문에 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 또한 홍수 규모가 커질수록 본류에서 부유쓰레기가 홍수터쪽으로 넓게 확장되는 한편 지류에서도 부유쓰레

기 거동이 활발해지고 그 범위가 크게 확장되는 것으로 분석되었다. 부유쓰레기가 한탄강댐 본류를 따라 불규칙하게 분포하는 것처럼 보이지만 만곡부 등을 중심으로 특정 지역에 밀집되어 집중되는 현상이 나타났다. 다량의 부유쓰레기가 고착되는 구간을 식별하기 위하여 분석구간을 하류부, 중류부, 상류부로 구분하여 비교하였다.

##### 4.3.2. 주요 구간 홍수 규모별 비교 분석 결과

다음 Fig. 10은 분석 구간에 하류부에 해당되며 홍수 규모 별로 제시한 결과를 나타낸다. 이 구간은 한탄강댐의 배수위 영향을 가장 크게 받으며 흐름이 가장 정체되는 구간으로 수리학적으로 부유쓰레기의 유동이 편기되는 만곡부 등에서 다량의 부유쓰레기가 높은 밀도로 분포할 것으로 나타났으며 범위와 정도의 차이는 있지만 홍수별로 비슷한 패턴을 보였다. 하류부의 주요 지점은 4지점으로 ①은 재인폭포 지점, ②는 부곡리 소하천 지점, ③은 신흥리 하도 좌안부, ④는 부곡리 하도 우안부로 구분할 수 있다.

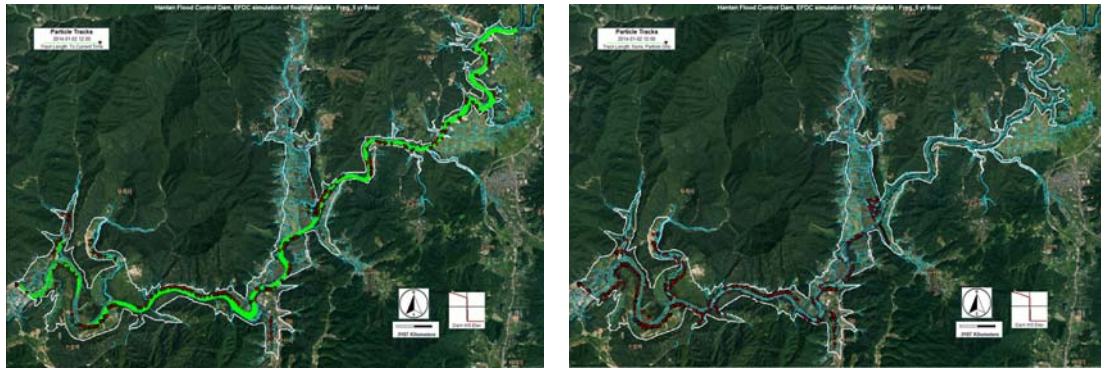




(a) Result of scenario 1.

(b) Result of scenario 2.

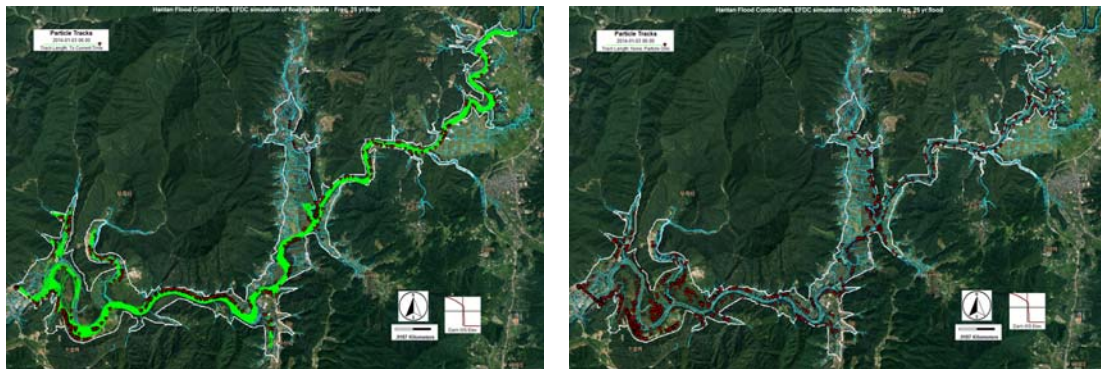
**Fig. 7.** Distribution and trace of floating debris (2 yr).



(a) Result of scenario 1.

(b) Result of scenario 2.

**Fig. 8.** Distribution and trace of floating debris (5 yr).



(a) Result of scenario 1.

(b) Result of scenario 2.

**Fig. 9.** Distribution and trace of floating debris (25 yr).

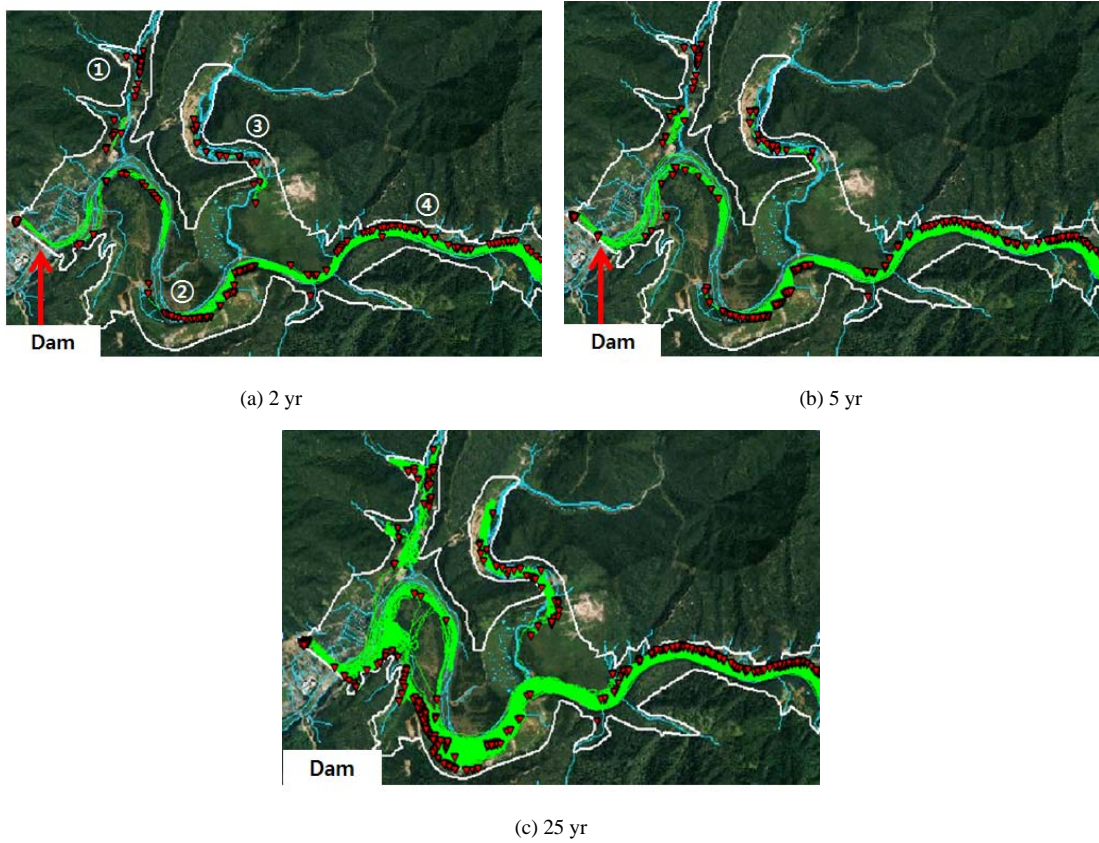


Fig. 10. Distribution of floating debris near the dam site.

지점 ①에 해당하는 재인폭포 부근은 하구에 이르는 광범위한 지역에 부유쓰레기가 분포할 가능성이 높다고 볼 수 있는 지점이다. 다음 Fig. 11은 재인폭포 지점의 소하천을 포함하여 확대한 결과이며, 2년 빈도 결과에서는 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 홍수 규모가 클수록 본류의 배수위가 상승하면서 재인폭포에서 하구에 이르는 구간에서 넓은 면적에 걸쳐 부유쓰레기의 불규칙한 뭍돌이 궤적이 형성되고 있어, 지류를 빠져나오지 못하고 그대로 고착될 가능성이 매우 높음을 보여주고 있다. 특히 25년 빈도 홍수 시에는 한탄강댐의 배수위가 재인폭포 상류쪽으로 확장되면서 부유쓰레기가 밀려 올라가서 일부는 소유역 상류부근까지 도달하며 홍수 종반기에 수위가 하강함에 따라 다시 하류쪽으로 쓸려 내려오면서 일부는 본류

로 빠져나가지만 대부분은 소하천 하도와 홍수터에 넓게 분포할 것으로 모의되었다.

지점 ②는 댐 직상류 신흥리 일대이며 하도 좌안부에 부유쓰레기가 집중될 것으로 분석되었으며, 25년 빈도 홍수시 홍수파가 한탄강 본류 하도를 월류하여 홍수터로 넓게 범람하는 지역에서는 소규모 홍수 시에 본류 하도 양안에 분포하던 부유쓰레기가 홍수터 쪽으로 밀려가서 고착되는 경향을 보였다.

③은 부곡리쪽 소하천 일대이며 다음 Fig. 12는 홍수 규모별로 확대한 그림이다. 부유물이 지류 유입 홍수량의 영향으로 하류쪽으로 약간씩 이동하지만 대부분 그대로 고착되며 특히, 본류와의 합류점 부근에 도달한 부유쓰레기는 유로 폭이 급 확대와 동시에 유속이 거의 없는 사수역 구간으로 변환에 따라 본류 배수위

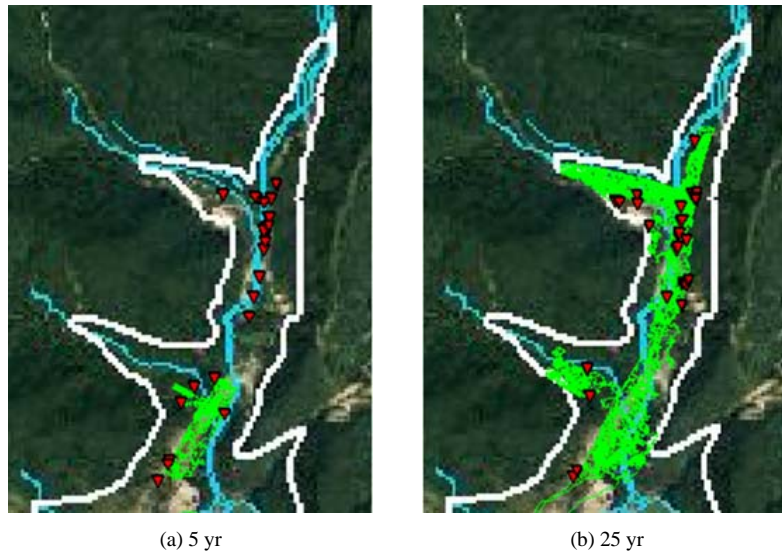


Fig. 11. Distribution of floating debris around Jaemin-waterfall in Bugok-ri.

의 영향으로 더 이상 진행하지 못하고 불규칙하게 맴 돌다가 부근에서 고착되는 것으로 모의되었다. 또한 홍수 규모가 커질 경우, 배수위 영향이 더욱 상류쪽으로 이동하면서 부유쓰레기가 하구까지 도달했다가 다시 상류쪽으로 밀려올라간 궤적을 확인할 수 있다.

지점 ④는 부곡리 본류 하도 우안부로 만곡에 의한 유수 흐름의 편기 현상으로 인하여 부유쓰레기의 분포가 우안에 집중되는 것으로 분석되었으며, 홍수규

모가 증가할 경우 더 높은 지대까지 분포할 것으로 예측되었다. 구간 중류부는 경사가 급하고, 상대적으로 하폭이 작으며, 만곡부가 많은 특징이 있다. 이에 따른 흐름 특성에 따라 부유쓰레기가 집중되는 곳이 거의 일정하게 나타났다. 다음 Fig. 13은 분석 구간 중류부에 해당되는 구간의 홍수 규모 별로 결과를 제시하였다. 주요 지점은 한탄강 본류로 유입되는 운산리쪽 소하천과, 건지천이 주요 지점으로 분석되었다.

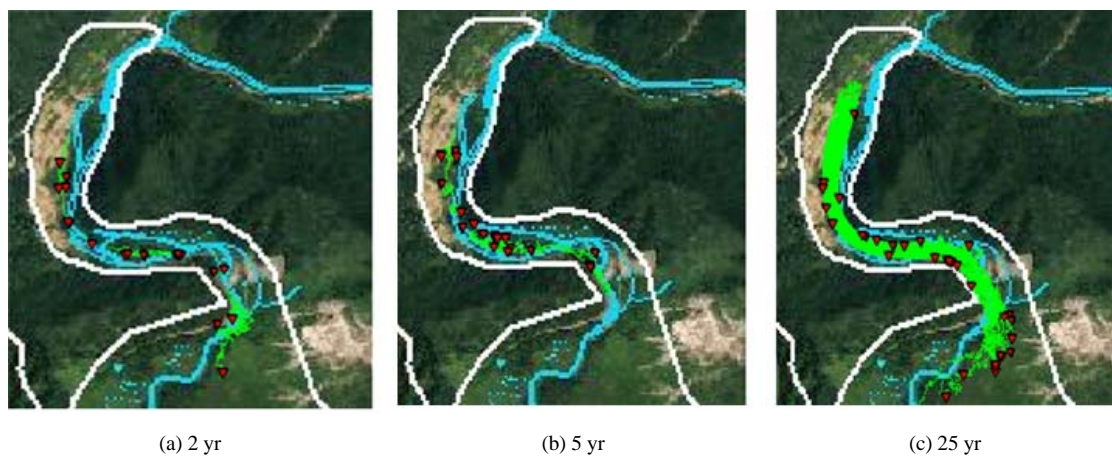


Fig. 12. Distribution of floating debris around a small river in Bugok-ri.

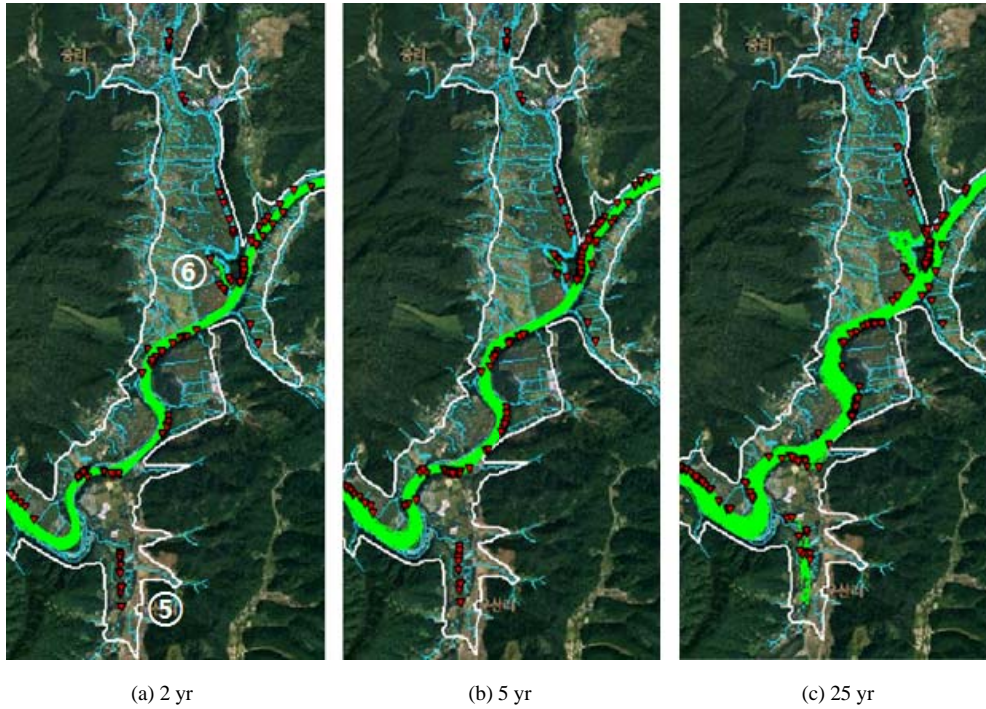


Fig. 13. Distribution of floating debris around middle area of the dam.

지점 ⑤에 해당하는 운산리쪽 소하천은 그림에 나타난 바와 같이 배수위 영향이 커서 상류쪽으로 부유쓰레기가 밀려 올라갔다가 홍수 중반기에 수위가 하강함에 따라 다시 하류쪽으로 쓸려 내려오면서 부유쓰레기가 소하천 하도와 홍수터에 넓게 분포할 것으

로 모의되었다. 적색 점으로 표시된 부유쓰레기가 5년 빈도 홍수 시에는 유로를 따라 일직선으로 분포하지만 25년 빈도 홍수 시에는 하도 좌우안 홍수터로 확산된 것을 볼 수 있다. 부유쓰레기 일부가 하구부 합류점 부근까지 도달하지만 본류로는 유입되지 않을 것으로

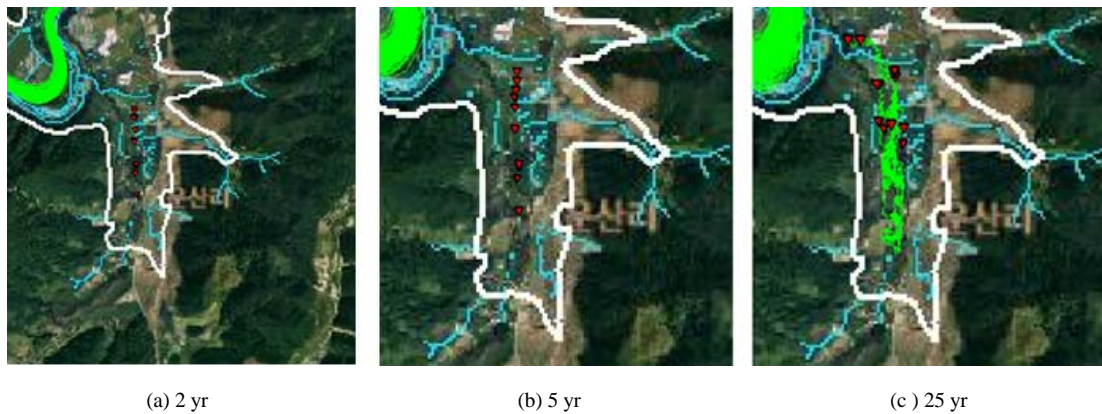
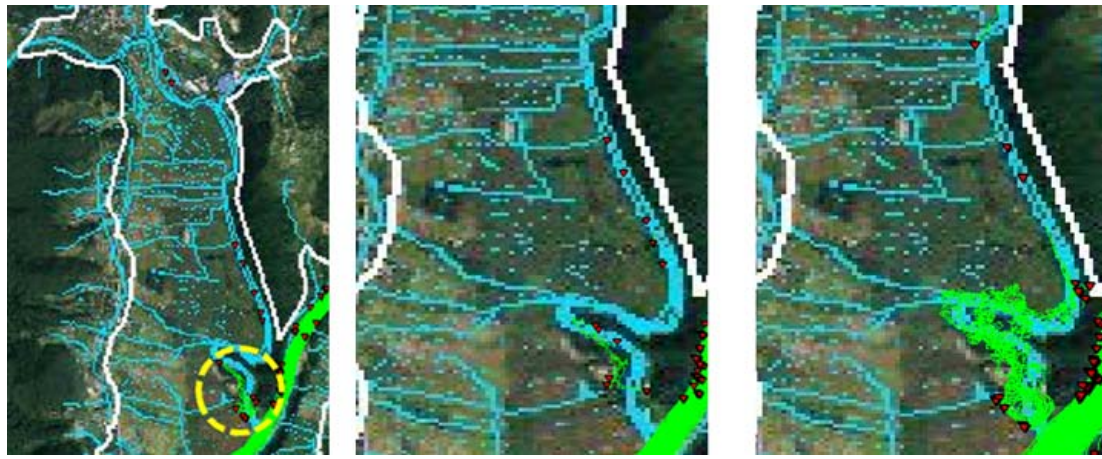


Fig. 14. Distribution of floating debris around a small river in Unsan-ri.



(a) 2 yr

(b) 5 yr

(c) 25 yr

Fig. 15. Distribution of floating debris around Gunji river in Jung-ri.

모의되었다.

지점 ⑥에 해당하는 건지천의 부유쓰레기 유동을 확대한 그림은 Fig. 15와 같다. 하구 부근의 부유쓰레기만 지류 유입 홍수량의 영향으로 하류쪽으로 이동하고 중상류쪽 부유쓰레기는 대부분 지류에 그대로 고착되는 것으로 모의되었다. 사수역에서 본류의 빠른 유속의 영향으로 시계방향의 와류가 형성되어 부유쓰레기가 원운동하다가 고착되는 궤적을 확인할 수 있었다. 2년 빈도 홍수에 비해 5년 빈도 홍수 시 배수위가 더욱 상승하면서 건지천 하구부에 미치는 영향이 증가하여 부유쓰레기가 유하하는 거리가 짧아졌으며 댐돌이 현상도 사라진 것을 볼 수 있다. 부유쓰레기가 댐돌이 현상을 일으킬 수 있는 하구까지 도달하지 못하고 더 위쪽에 머무르고 있기 때문이다. 25년 빈도 시 부유쓰레기의 궤적이 마치 브라운 운동의 궤적처럼 불규칙한 것은 유속이 거의 없는 상태에서 발생하는 부유쓰레기의 무작위적 확산(random dispersion) 과정을 보여주는 것으로 건지천 하구에 유속이 거의 없는 정체지역이 형성됨을 의미한다. 그리고 본류와 인접한 건지천 하구부 수역에 빠른 본류의 유속으로 인하여 와류가 형성되면서 부유쓰레기의 댐돌이 궤적이 다시 나타나고 있다. 이는 한탄강댐의 배수위 영향도 있지만, 건지천의 지형적인 특성에 따른 결과로 판

단된다.

#### 4.4. 적치장 최적 위치 선정

본 연구에서는 최종적으로 효과적인 부유쓰레기 수거처리를 위한 적치장 위치를 선정하였다. 부유쓰레기 거동 모의 결과를 토대로 홍수조절용지 내 위치하고 있는 기존 도로를 충분히 활용할 수 있는 접근성과 쌓인 부유쓰레기의 적절한 처리를 위한 이동성을 고려하여 총 7지점을 선정하였다. 그 결과는 아래 Fig. 16과 같다.

지점 ①과 지점 ②는 부유쓰레기 모의 결과가 부유물이 상대적으로 많이 고착되는 구간은 아니지만 댐의 배수위 영향권 내로 유속이 작은 구간이며 부유쓰레기가 본댐 내로 유입되어 통수에 문제가 발생하지 않도록 방어 할 수 있는 최종적인 지점이다. 지점 ③, 지점 ④, 지점 ⑤, 지점 ⑥, 지점 ⑦은 본류 배수위 영향으로 본류에 유입되지 못한 채 지류 하구부에 고착되며, 홍수 빈도가 커질수록 배수위가 더욱 상승하면서 넓은 면적에 걸쳐 부유쓰레기의 불규칙한 댐돌이 궤적이 형성되고, 댐 배수위의 영향과 사수역 구간에서의 와류 등의 영향으로 홍수터에 부유쓰레기가 고착될 우려가 있는 지점으로 선정하였다.



Fig. 16. Selected points for the collection of floating debris.

## 5. 결론

부유쓰레기가 한탄강댐 본류를 따라 불규칙하게 분포하는 것처럼 보이지만 만곡부 등을 중심으로 특정 지역에 밀집되어 집중되는 현상이 나타날 수 있는 주요 지점을 선정하였고, 본 결과를 토대로 효과적인 부유쓰레기 수거처리를 위한 적지장 위치를 선정하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 2년 빈도 홍수 시에는 부유쓰레기가 본류에서는 하도의 좌우안에 고착되는데 하도의 만곡 등에 영향을 받아 부분적으로 높은 밀도로 집중되는 구역들을 식별하였고, 한탄강의 지류 중에서도 재인폭포, 부곡리 소하천과 건지천 사이 구간에 위치한 지류와 중상류 구간에서 발생한 부유쓰레기는 본류 홍수량에 따라 대부분 거동하지 못하고 고착될 것으로 모의되었으며, 하구부에 도달할지라도 댐 배수위의 영향과 사수역 구간에서의 와류 등의 영향으로 지류 하구부를 벗어나지 못할 것으로 모의되었다.

2. 5년 빈도 홍수 시는 2년 빈도 홍수와 같은 패턴을 보였으며, 배수위가 더욱 상승하면서 넓은 면적에 걸쳐 부유쓰레기가 불규칙한 댐들이 궤적을 형성하고 하구까지 도달하였다가 상류쪽으로 밀려올라간 궤적

이 나타났다.

3. 25년 빈도 홍수 시에는 한탄강댐 배수위 영향이 커서 상류쪽으로 부유쓰레기가 밀려 올라갔다가 홍수 종반기에 수위가 하강함에 따라 다시 하류쪽으로 흘러 내려오면서 부유쓰레기가 소하천 하도와 홍수터에 넓게 분포할 것으로 모의되었다.

4. 부유쓰레기 거동 모의 결과와 접근성을 바탕으로 효과적인 부유쓰레기의 처리를 위한 적정위치 7지점을 선정하였다.

본 연구는 친환경적인 홍수터 활용을 위한 효과적인 부유쓰레기 처리 방안 등을 제시하였으며, 유입 부유쓰레기 정량적인 양, 분포 등이 없어 이를 가정하였지만 추후 중장기적으로 부유쓰레기 분포에 대한 현장조사 등을 수행하고, 이를 바탕으로 부유쓰레기 유동해석을 체계적으로 검증 및 보완이 필요할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- Bang, K. Y., 2013, Numerical modeling of seasonal sedimentary processes and sediment budget in the Youngsan river estuary, Ph. D, Dissertation, Inha University.

- Choi, J. H., 2012, Application of EFDC model to cohesive sediment transport in the Mokpo coastal zone, M.S, Dissertation, Hannam University.
- Hamrick, J. M., 1992, A three dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects, Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Heo, Y. J., 2008, The Study of scouring and deposition with 3-dimension model in Sihwa lake after generating Sihwa tidal power plant, M.S, Dissertation, Chungnam National University.
- Jang, C. R., 2014, Establishment of the eco-friendly utilization and management plan in Hantan river dam basin, M.S, Dissertation, Kyungpook National University.
- Jung, T. S., Hwang, J. H., 2003, Modeling of water circulation and suspended sediment transport in lake Daecheong, Journal of the Korea Society for Marine Environmental Engineering, 6(4), 67-82.
- Kim, K. M., 2014, An Study on sediment distribution characteristic of Guem river estuary, M.S, Dissertation, Pukyong National University.
- K-water, 2008, The Basic and Masterplan of Hantangang-dam.
- K-water, 2014, A report on the establishment of management in Hantangang-dam floodplain.
- Lee, W. H., 2011, Numerical prediction for behaviors of suspended sediments around the Youngjong Island, M.S, Dissertation, Hanyang University.
- Lempérière, F., 2006, The role of dams in the XXI century, Achieving a sustainable development target, Hydropower and Dams, Issue Three, 99-108.
- Oh, K. D., 2009, Hydrological analysis according to Vflo™ distributed model, The 20<sup>th</sup> Hydraululic Engineering Workshop, Korea Water Resources Association (KWRA).
- Park, J. P., Cho, Y. K., Joo, S. S., Yeon, W. C., 2011, Numerical analsis of floating debris behavior for a barrer system design, Proceeding of Korea Water Resources Association (KWRA), 170-174.
- Sumi, T., 2008, Designing and Operating of Flood Retention 'DRY' Dams in Japan and USA.