

단기 홍수 지침 곡선을 이용한 남강댐의 홍수조절에 관한 연구

A Study for Flood Control of Namgang Dam with Flood Guide Curve in Flood Event

Taeuk Kang*, Sangjin Lee**, Seonho Choi***

K-water Research Institute, 125, Yuseong-daero 1689 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 305-730*

K-water Research Institute, 125, Yuseong-daero 1689 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 305-730**

Changshin University, Dept. of Civil & Plant Engineering, 262, Palyong-ro MasanHoewon-gu, Changwon 630-764***

Abstract

Upstream area of Namgang Dam is mountainous and has steep channel bed slopes, so the flood hydrograph from a storm rises rapidly. Namgang Dam operators have difficulties in flood control every year because the dam has small flood control capacity for catchment area and there are some restrictions on upstream and downstream of Namgang Dam to store or release water. The purpose of the study is to propose a flood guide curve in flood event of Namgang Dam for effective flood control. We analyzed major historical 14 flood events and simulated them by the COSFIM(Coordinate Operation System for Flood control In Multi-reservoir) that is hydrological flood routing model. The flood guide curve of Namgang Dam was determined by estimating application time of the flood guide curve and operation guide stages & ranges in process of flood time. The flood guide curve may be effectively used in flood control of Namgang Dam.

Key words: flood guide curve, flood control, Namgang Dam, COSFIM

국문초록

남강댐의 상류유역은 산악지형이 대부분이기 때문에 하상경사가 매우 급하고, 홍수 시 유량이 급격히 증가한다. 또한, 유역면적에 비해 홍수조절 용량이 매우 작고, 상하류의 제약으로 인해 남강댐 운영자는 해마다 홍수

* Tel. +82-42-870-7482. Fax. +82-42-870-7419. E-mail. ktw62@hanmail.net

** Corresponding author. Tel. +82-42-870-7402. Fax. +82-42-870-7419. E-mail. sjlee@kwater.or.kr

Submission & Publication Process

Received: Oct. 17, 2014 / Revised: Nov. 11, 2014 / Accepted: Dec. 1, 2014

시 댐 운영에 어려움을 겪고 있다. 본 연구의 목적은 남강댐의 홍수 시 효과적인 댐 운영을 위해 단기 홍수 지침 곡선을 제시하는데 있다. 이를 위해 과거 남강댐에서 발생한 14개의 주요 홍수사상을 분석하였고, 수문학적 홍수 추적 모형인 COSFIM을 이용하여 과거 주요 홍수사상을 모의하였다. 단기 홍수 지침 곡선은 홍수 지침 곡선의 적용 시점과 홍수 진행에 따른 지침 수위와 운영 구간을 추정함으로써 결정되었다. 본 연구에서 제시한 홍수 지침 곡선은 남강댐 홍수조절에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주제어: 홍수 지침 곡선, 홍수조절, 남강댐, COSFIM

1. 서론

낙동강 유역에 위치한 남강댐은 남강 본류를 유하하는 본 댐과 가화천 방향으로 설치된 제수문을 통해 사천만으로 직접 유하하게 하는 특수한 방식으로 홍수를 조절하고 있다. 200년 빈도 계획홍수량인 10,400 m³/s의 유량이 유입 시 계획방류량(4,050 m³/s) 중 80 %인 3,250 m³/s를 사천만으로 방류하고, 나머지 20 %(800 m³/s)는 남강댐 직하류로 방류함으로써 진주시뿐만 아니라 낙동강 본류의 홍수량 경감에 크게 기여하고 있다(Lee, *et al.*, 2006; Jung, *et al.*, 2007).

하지만 남강댐 유역은 덕유산과 지리산이 분포하는 산악지형으로 되어 있어 유역과 하천의 경사가 급하고, 여름철 저기압과 태풍으로 인해 집중호우가 많이 발생하는 지역이다. 이에 따라 집중호우 발생 시 하천의 유량이 급격히 증가하여 35시간 만에 첨두 홍수량이 발생한다. 또한, 남강댐은 바다와 가까운 준 평야지대에 위치하고 있어, 저수지 면적에 비해 저수용량이 현저히 작아 남강댐 운영자들은 해마다 홍수조절에 어려움을 겪고 있다.

홍수 시 댐 운영에 관한 연구는 수자원 시스템 분야의 오랜 연구 대상으로 되어 왔고, 적용된 기법에 따라 다양한 연구가 수행되었다. Windsor(1973)는 주요 지점의 피해를 최소화하기 위해 순환 선형 계획법(recursive linear programming)을 적용하였고, Unver & Mays(1990)는 저수지 군의 실시간 홍수조절에 비선형 계획법(non-linear programming)을 이용하였다. 또한, Needham, *et al.*(2000)과 Hsu & Wei(2007)는 혼합 정수 계획법(mixed integer linear programming)을 홍수 시 댐 운영에 활용하였다. 그리고 2000년 중·후반에는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)과 집합체 혼합진화(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA) 알고리즘과 같은 전역 최적화(global optimization) 알고리즘을 이용한 연구도 수행되었다(Reddy & Kumar, 2006; Ngo, *et al.*, 2007; Cheng, *et al.*, 2008; Malekmohammadi, *et al.*, 2010). 하지만 이러한 최적화 이론은 실제 홍수 상황의 순간적인 변화나 댐 운영자의 직관과 경험이 충분히 반영될 수 있도록 유연하지 못한 단점을 가진다(Cheng & Chau, 2001). 특히, 남강댐의 경우, 홍수 시 도달시간이 매우 빠르고, 국지적으로 발생하는 강우의 예측이 어려우므로 댐 유입량 예측의 신뢰도가 낮다. 따라서 본 연구에서는 이러한 남강댐의 홍수조절 여건을 종합적으로 고려하여 보다 직관적이고, 적용이 간단한 홍수조절 방법을 도출하고자 하였다.

한편, 미국 테네시강 유역의 물 관리를 담당하고 있는 테네시 계곡 개발청(Tennessee Valley Authority; TVA)은 효과적인 댐 관리를 위해 각각의 댐에 대하여 상·하한 수위 등의 연중 운영 지침(operating guide)을 제시하고 있다. 댐 운영 수위의 하한은 이수 측면을 위해 유지해야 할 수위이고, 상한 수위는 홍수조절 목적의 수위이다. 이러한 댐 운영 지침은 장기간의 댐 운영을 목적으로 하므로 주로 월 단위로 산정된다. 본 연구에서는 이러한 장기간의 댐 운영 지침의 개념을 활용하여 단기 홍수 지침 곡선(flood guide curve in flood event)을 개발하고자 하였다. 즉, 본 연구의 목적은 남강댐의 홍수 시 효과적인 홍수조절을 위하여 단기 홍수 지침 곡선을 제시하는 것이다.

본 연구에서는 남강댐의 단기 홍수 지침 곡선을 추정하기 위해 과거 남강댐 유역에 발생한 주요 14개 홍수사상에 대한 수문자료를 분석하였다. 그리고 단기 홍수 지침 곡선은 홍수 지침 곡선의 적용 시점과 남강댐 운영의 상·하한 경계와 상·하한 운영 수위 및 지침 수위의 결정을 통해 추정되었다.

II. 남강댐 단기 홍수 지침 곡선의 결정 방안

1. 대상유역

1) 남강댐과 유역

남강댐은 진주시 및 사천시 등의 생·공용수 공급과 낙동강 본류의 상습적인 홍수피해를 방지하기 위해 1969년에 축조되었다. 이후 인근지역의 도시개발에 따른 용수수요 확대 및 홍수발생에 따른 피해 증가로 재개발의 필요성이 대두되어 1999년 남강 보강댐이 준공되었다(Korea Development Institute, 2009).

남강댐의 유역면적은 2,285 km²으로서 소양강댐과 유사한 규모이다. 하지만 남강댐은 사천만측 홍수 배제를 위해 바다와 가까운 준 평야지대에 위치하고 있어 저수지 면적에 비해 저수용량이 매우 작다. 실제로, 남강댐의 저수면적은 합천댐의 133 %이나, 저수용량은 합천댐의 39 %에 불과하고, 200년 빈도 홍수량은 소양강댐과 비슷하지만, 홍수조절 용량(홍수기 제한수위~계획홍수위)은 소양강댐의 29 %에 불과하다. <표 1>은 남강댐의 주요 제원을 나타낸 표이다.

한편, 남강댐 유역은 덕유산과 지리산 등 산지가 많아 하천의 경사가 급하여 홍수기에는 하천 수위가 매우 빠르게 상승하고 도달시간이 매우 짧다. 그리고 여름철 저기압과 태풍 등의 진행방향에 위치하여 향사면과 배사면의 강우분포에 의한 편차가 심한 지역에 해당한다(Bae, 2008).

<표 1> 남강댐의 주요 제원

구분	단 위	제 원	비 고	
유역 면적	km ²	2,285		
저수 용량	총 저수 용량	10 ⁶ m ³	309.2	
	홍수조절 용량	10 ⁶ m ³	269.8	
댐 수위	홍수위	El. m	46.0	
	상시 만수위	El. m	41.0	홍수기 제한 수위: El. 41.0 m
	저수위	El. m	32.0	
계획 홍수량	유입량	m ³ /s	10,400	
	방류량	m ³ /s	4,050	남강측 방류: 800 m ³ /s 사천만측 방류: 3,250 m ³ /s

2) 홍수 시 남강댐 운영에 관한 제약사항

남강댐의 직상류 지역은 준 평야지대로서 가옥과 농경지가 광범위하게 분포하여 댐 운영에 큰 제약사항으로 작용하고 있다. 특히, 진주시 대평, 사천시 완사·금성, 산청군 소남지구 등의 농지 최저 표고는 각각 El. 43.8 m, El. 43.0 m, El. 45.0 m로서, 남강댐의 계획홍수위(El. 46.0 m) 보다 낮게 조성되어 있다. 이에 따라 댐 수위 상승 시 내수 배제 불량으로 인한 침수피해가 빈번하게 발생하고 있는데, 실제로 일부 농경지의 경우 농지 침수에 따른 법정 소송이 제기되기도 하였다.

남강댐 하류의 경우에도 남강 본류 측 하천 구역에 편의시설, 비닐하우스 등의 지장물이 광범위하게 분포하고 있고, 무제부 구간 및 미 개수 구간이 존재하여 홍수통제소에서는 남강 본류로 방류하는 것을 규제하고 있다. 실제로 남강댐의 본류 측 계획방류량은 800 m³/s이지만, 기왕 최대 방류량은 500 m³/s이다. 뿐만 아니라, 사천만의 경우에도 어업피해 등으로 다수의 집단 민원이 발생하는 등 남강댐 방류에 의한 하류 제약이 발생하고 있다.

따라서 남강댐의 홍수 시 운영에서는 저수지 담수에 의한 댐 상류의 침수 문제와 여수로 방류에 의한 댐 하류의 홍수 피해에 대한 고려가 필요하다.

2. 남강댐의 주요 홍수사상

본 연구에서는 남강댐의 단기 홍수 지침 곡선을 결정하기 위해 2002년부터 2013년까지 발생한 14개의 홍수사상을 검토하였다. <표 2>는 각각의 홍수사상에 대한 최대 강우강도와 첨두 유입량 및 발생시간을 나타내고 있다. 14개 홍수사상의 최대 강우강도의 평균은 26.2 mm/hr, 첨두 유입량의 평균은 7,848 m³/s이며 평균 도달시간은 5시간인 것으로 분석되었다. 이 때 도달시간은 각 홍수사상에서 최대 강우강도의 발생시간으로부터 첨두 유입량이 발생한 시간까지의 지체시간으로 추정하였다.

특히, 14개의 홍수사상 가운데, 태풍 산바, 무이파, 예위니아, 매미, 루사 시 첨두 유입량은 남강댐 계획홍수량인 10,400 m³/s를 초과한 것으로 나타났다. 또한, 해당 홍수사상의 도달시간은 약 3시간으로서 매우 단시간에 계획홍수량을 초과한 유입량이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 해당 홍수사상들

은 남강댐의 홍수 지침 곡선의 상한을 결정하는데 중요하게 활용되었다.

<표 2> 남강댐 유역에 발생한 주요 홍수사상

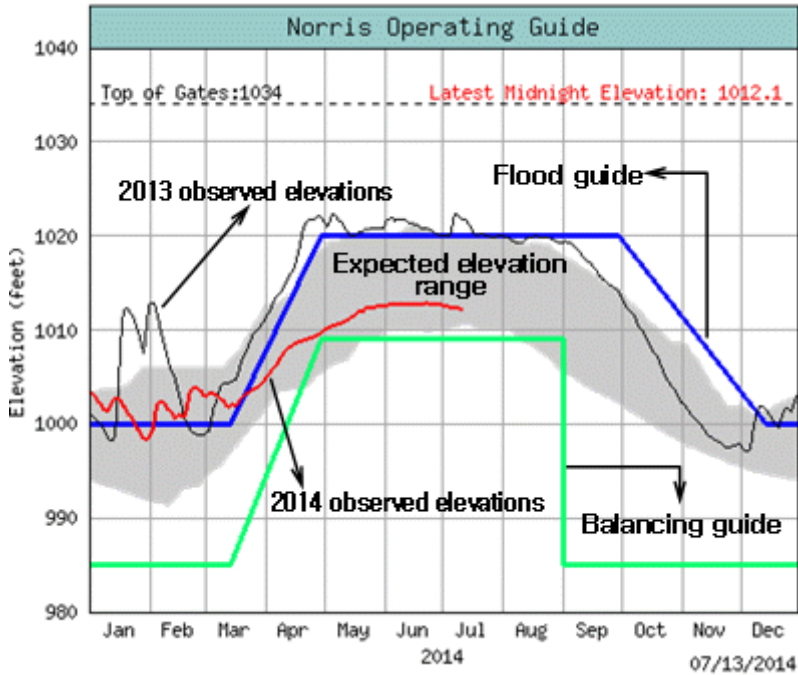
구분	홍수사상	최대 강우강도		첨두 유입량		도달시간 (hour)	주요 태풍
		발생 시간	강우강도 (mm/hr)	발생 시간	유입량 (m³/s)		
1	2012.09.16.~09.17.	09.17. 13:00	32.9	09.17. 15:00	14,101	2	산바
2	2011.08.07.~08.08.	08.08. 00:00	31.9	08.08. 03:00	10,648	3	무이파
3	2011.06.25.~06.26.	06.26. 09:00	17.9	06.26. 14:00	5,711	5	
4	2010.08.10.~08.11.	08.11. 03:00	20.8	08.11. 09:00	5,846	6	
5	2010.07.16.~07.17.	07.16. 18:00	14.8	07.17. 04:00	3,005	10	
6	2007.09.16.~09.17.	09.16. 20:00	39.0	09.17. 00:00	8,792	4	
7	2006.07.10.~07.11.	07.10. 12:00	35.6	07.10. 15:00	12,214	3	에위니아
8	2005.07.02.~07.03.	07.02. 07:00	19.8	07.02. 12:00	2,844	5	
9	2004.08.18.~08.19.	08.18. 19:00	28.8	08.18. 23:00	6,070	4	
10	2004.06.19.~06.20.	06.19. 15:00	18.0	06.20. 00:00	2,506	9	
11	2003.09.12.~09.13.	09.12. 21:00	34.4	09.13. 01:00	12,082	4	매미
12	2002.08.31.~09.01.	08.31. 16:00	33.8	08.31. 20:00	14,818	4	루사
13	2002.08.07.~08.08.	08.17. 19:00	13.7	08.08. 01:00	5,442	6	
14	2002.07.05.~07.06.	07.05. 18:00	25.5	07.05. 23:00	5,792	5	
평균			26.2		7,848	5.0	

3. 남강댐에 대한 단기 홍수 지침 곡선의 추정 방안

1) 미국 테네시 계곡 개발청의 댐 운영 지침

미국의 테네시 계곡 개발청은 테네시강 유역의 물 관리에 관한 효과적인 의사결정을 위해 댐 운영 지침을 활용하고 있다. 테네시 계곡 개발청의 댐 운영 지침은 홍수조절 공간을 충분히 활용하고, 수력 발전, 주운, 수질, 레크리에이션 등을 통한 수익 창출에 기여한다. 댐 운영 지침은 과거 수십 년간의 운영 경험에 근거하고, 용수 사용에 관한 수요 변화와 연중 필요한 홍수조절 공간뿐만 아니라 유역의 규모와 형상, 저수지 수표면적, 평균 강우-유출 등 저수지의 저류 또는 방류와 관련된 모든 특징을 고려하여 결정된다.

테네시 계곡 개발청에서는 장기간의 과거 수문자료를 이용하여 댐 운영 지침 곡선을 작성하는데, <그림 1>은 예로서 Norris 댐의 지침 곡선을 나타낸다. 테네시 계곡 개발청은 100년 이상의 수문자료를 이용하여 댐을 모의 운영하고, 모의 결과 중 80 % 확률의 댐 수위 구간을 도시하여 댐 운영에 활용하고 있다(<그림 1>의 음영으로 표시된 영역). 그리고 테네시 계곡 개발청에서는 많은 관리 대상 댐들에 대하여 연중 동등한 수준으로 이수(利水) 용량을 확보하기 위한 지침(balancing guide)과 홍수 측면의 지침(flood guide)을 제시하고 있다.



<그림 1> TVA Norris Dam의 운영 지침 곡선

2) 남강댐의 단기 홍수 지침 곡선의 결정 방법

전 절에서 기술한 테네시 계곡 개발청의 댐 운영 지침은 연간 댐 운영을 위한 장기적인 지침 수위에 해당한다. 본 연구에서는 이에 착안하여 홍수 시 적용할 수 있는 단기 홍수 지침 곡선을 결정하고자 하였다. 단기 홍수 지침 곡선을 결정하기 위해서는 우선, 홍수 지침 곡선의 적용 시점을 결정해야 한다. 즉, <그림 1>에서 제시된 테네시 계곡 개발청의 댐 운영 지침과 같이 연중 시기별로 적용해야 할 기준이 명확히 제시되어야 한다. 특히, 홍수의 경우, 발생하는 강우의 규모, 강도, 시간적 분포, 지속기간 등에 따라 다양하게 나타나므로 홍수 지침 곡선을 적용하는 시점을 정의하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 <표 2>의 과거 홍수 기록자료와 댐 운영 자료를 통해 홍수 지침 곡선의 적용 시점을 결정하고자 하였다.

남강댐에서는 두 가지의 관점을 고려한 홍수 지침 곡선이 요구된다. 첫 번째는 댐 저수용량에 비해 유입량이 과다하여 홍수 시 수위가 급격하게 상승하는 것을 고려해야 한다. 이를 위해 댐의 안전을 확보하고, 댐 상류에 위치한 지장물의 침수를 발생시키지 않는 댐 운영 기준이 필요하다. 실제로 남강댐 관리단에서는 홍수조절 용량 확보를 위해 홍수 전 댐 수위를 El. 35.0m까지 낮추는 예비 방류를 계획하고 있다. 두 번째는 효과적인 홍수조절의 필요성이다. 남강댐 유역은 산지가 많아 국지성 강우가 많고, 상류에 위치한 다수의 수위관측소의 수위-유량 관계는 불확실성이 크다. 이에 따라 홍수 시 남강댐의 유입량 예측에는 많은 오차가 포함되어 부정확성이 크고, 이는 효과적인 댐 운영에 장애가

되고 있다. 실제로 과거의 일부 홍수사상의 경우, 홍수 초기에 댐 방류를 다소 과다하게 시행하여 홍수조절을 효과적으로 수행하지 못하였다. 따라서 홍수조절 용량을 충분히 활용할 수 있는 홍수 지침 곡선이 요구된다.

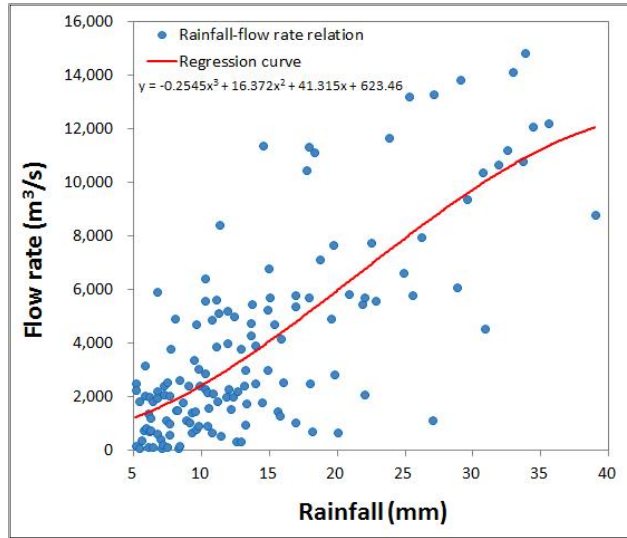
III. 남강댐 단기 홍수 지침 곡선의 적용 시점 검토

1. 남강댐 유역의 수문 분석

1) 강우량-유입량 관계 분석

홍수 지침 곡선은 기본적으로 많은 양의 강우가 예상되어 남강댐의 홍수조절이 필요한 시점에서부터 사용되어야 한다. 본 연구에서는 남강댐의 홍수 지침 곡선 활용 시 적절한 적용 시점을 검토하기 위해 <표 2>에 제시된 14개 홍수사상의 유역 평균 강우량과 남강댐의 유입량 관계를 분석하였다. 이때 강우량-유입량의 관계는 홍수 시 기저유출을 감안하여 침투 유입량 발생시점 정도까지의 자료를 활용하였고, 5mm 이상의 강우를 대상으로 하였으며 시간 단위의 자료를 활용하였다. 또한, 각 홍수사상의 도달시간은 서로 상이하므로 이를 고려하여 강우량과 유입량을 1:1 대응시켰다. 예를 들면, 도달시간이 5시간인 홍수사상의 강우량-유입량의 관계는 5시간 전 강우량과 현재의 유입량을 하나의 조합 자료로 구성하였다.

<그림 2>는 남강댐의 유역 평균 강우량과 남강댐 유입량의 관계를 도시한 그림이다. 그리고 해당 관계를 3차 회귀곡선으로 나타내었다. <그림 2>의 회귀곡선은 대체로 직선에 가깝기는 하지만 변화양상을 검토하기 위해 변곡점을 산정하였고, 그 결과 21.4mm로 분석되었다. 이는 유역 평균 강우량이 약 20mm/hr 부근에서 상대적으로 유입량 상승이 가장 빠른 것을 나타내므로 그 이전 시점부터 홍수조절이 필요함을 의미한다. 실제로 20mm/hr의 강우량에 대한 회귀식으로 결정된 유입량은 약 6,000m³/s로서 이는 남강댐의 계획방류량을 초과한다. 따라서 유역 평균 강우량이 20mm/hr 이전 시점에서부터 홍수 지침 곡선의 적용이 필요하다.



<그림 2> 남강댐의 강우량-유입량 관계

2) 주요 5개 홍수사상의 검토

남강댐 유역의 홍수 도달시간은 매우 빠르므로 홍수 지침 곡선의 적용 시점이 지나치게 늦으면, 효과적인 홍수조절을 기대할 수 없다. 따라서 연구에서는 남강댐 유역에 가장 큰 홍수를 유발한 5개 주요 태풍의 수문자료를 분석하였다. 연구에서는 각 홍수사상에 대하여 시간당 강우량이 특정한 값을 초과하는 시점부터 침투 강우와 침투 유량이 나타나는 시간을 검토하여 홍수 지침 곡선의 적용 시점을 유역 평균 강우량이 12mm/hr 이상인 시간으로 결정하였다. 주요 5개 홍수사상에서 12mm/hr를 초과하기 시작한 시점부터 침투 강우는 약 5시간 이후, 침투 유량은 약 8시간 이후에 발생하는 것으로 나타났다(<표 3>).

따라서 본 연구에서는 남강댐 홍수 지침 곡선의 적용 시점을 현재의 유역 평균 강우량이 12mm/hr를 초과하고, 강우 예측 및 태풍의 이동 경로 등을 고려하여 향후에 계속해서 강우가 예상되는 경우로 설정하였다.

<Table 3> 주요 홍수사상에 대한 최대 강우강도 및 첨두 유입량 분석

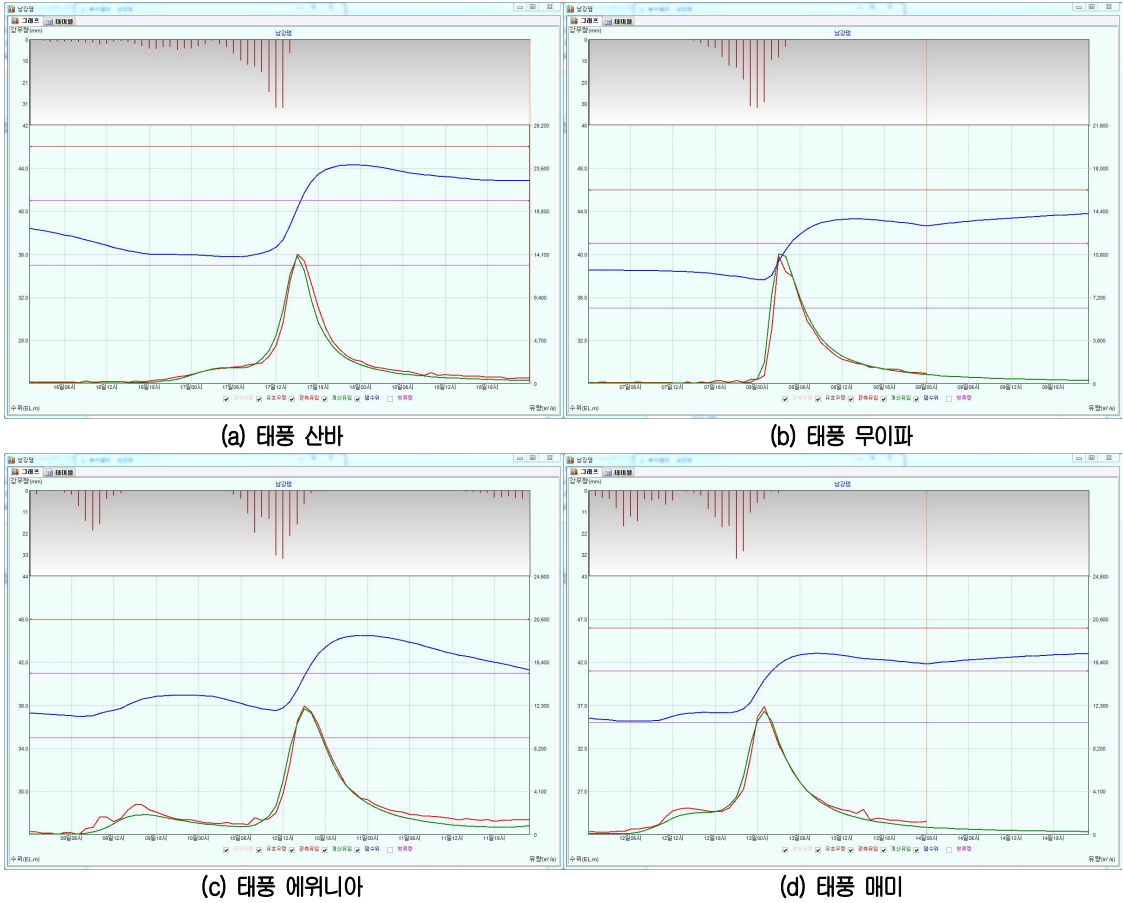
홍수사상 (태풍)	12 mm/hr 강우의 초과 시점	최대 강우강도			첨두 유입량			비 고
		발생 시간	강우강도 (mm/hr)	경과 시간 (hour)	발생 시간	유입량 (m ³ /s)	경과 시간 (hour)	
산바	2012-09-17 08:00	2012-09-17 13:00	32.9	5	2012-09-17 15:00	14,101	7	남강댐 계획홍수량 (10,400 m ³ /s)
무이파	2011-08-07 20:00	2011-08-08 00:00	31.9	4	2011-08-08 03:00	10,648	7	
에위니아	2006-07-10 07:00	2006-07-10 12:00	35.6	5	2006-07-10 15:00	12,213	8	
매미	2003-09-12 18:00	2003-09-12 21:00	34.4	3	2003-09-13 01:00	12,081	7	
루사	2002-08-31 10:00	2002-08-31 16:00	33.8	6	2002-08-31 20:00	14,818	10	

2. COSFIM 모형을 이용한 홍수 지침 곡선의 적용 시점 검토

1) COSFIM 모형의 보정

본 연구에서는 <표 2>의 14개 대상 홍수사상에 대하여 COSFIM(coordinate operation system for flood control in multi-reservoir) 모형을 이용하여 남강댐 모의 운영 모형을 구성하였고, 각각의 홍수사상에 대하여 모형을 보정하였다. 본 연구에 사용된 COSFIM 모형은 수문학적 홍수추적 모형으로서 1985년부터 K-water에서 개발한 저류함수법에 근간을 둔 유역유출 모형이다(Lee, 2012). K-water에서는 COSFIM 모형을 4대강 수계 내에 위치한 16개 다목적댐, 15개 용수전용댐, 8개 다기능보 홍수조절 운영에 활용하고 있다.

COSFIM 모형의 보정 대상은 남강댐 유입량이고, 모형의 보정에는 전역 최적화 알고리즘인 집합체 혼합진화(shuffled complex evolution-University of Arizona; SCE-UA) 알고리즘이 사용되었다. <그림 3>은 COSFIM 모형의 보정 결과로서 태풍 산바, 무이파, 에위니아, 매미에 대한 관측 및 계산된 홍수 수문곡선을 나타낸다.



<그림 3> 주요 홍수사상에 대한 COSFIM 모형의 보정 결과

2) 홍수 지침 곡선의 적용 시점 검토

전 절에서 유역 평균 강우량이 12mm/hr인 시점에서 홍수 지침 곡선을 적용하는 것으로 하였다. 본 절에서는 남강댐 유역에 가장 큰 홍수를 유발한 5개 주요 태풍에 대하여 COSFIM 모형을 이용하여 해당 시점의 적절성을 검토하였다. 홍수 지침 곡선 적용 시점의 적절성은 유역 평균 강우량이 12mm/hr인 시점에서 여수로 방류를 수행하여 홍수조절이 가능한지 검토함으로써 수행되었다. 각 홍수사상에 대한 여수로 방류량은 홍수사상별 실제 최대 방류량으로 하였고, 방류기간은 24시간으로 하였다. 다만, 댐 수위에 따라 여수로 방류 능력이 제약을 받으므로 이러한 경우에는 여수로 방류 능력에 해당되는 양이 방류되었다.

<표 4>는 COSFIM의 모의 결과를 나타낸다. <표 4>에서 볼 수 있듯이 계산된 결과는 모든 홍수 사상에서 실제 최고 댐 수위 이하의 운영 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 유역 평균 강우량이 12mm/hr인 시점을 홍수 지침 곡선의 적용 시점으로 설정하는 것은 적절한 것으로 판단되었다.

<표 4> 남강댐 홍수 지침 곡선의 적용 시점에 대한 검토

홍수사상 (태풍)	초기 수위 (El. m)	남강댐 방류량 (m³/s)	남강댐 최고 수위(El. m)		수위 차이(m) (a)-(b)
			관측(a)	계산(b)	
산바	35.87	2,512	44.30	44.13	0.17
무이파	38.11	2,482	43.27	41.74	1.53
에위니아	38.18	3,583	44.48	43.27	1.21
매미	36.13	3,459	43.03	42.98	0.05
루사	36.01	5,512	45.48	42.53	2.95

IV. 남강댐 단기 홍수 지침 곡선의 추정

1. COSFIM 모형을 이용한 과거 댐 운영에 대한 사후 분석

홍수 지침 곡선은 댐의 효과적인 운영을 위해 사용된다. 즉, 홍수 지침 곡선은 홍수 시 해당 지침 곡선을 따라 운영할 경우, 적절한 운영이 될 수 있도록 설정되어야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 <표 2>에 제시한 홍수사상에 대하여 당시의 댐 운영 기록을 검토하였다. <표 5>는 과거 남강댐 운영을 적절하게 수행한 결과로서, 공통적으로 홍수 전 예비 방류를 통해 초기 수위를 충분히 낮추었다. 그리고 홍수조절 공간을 충분히 사용하여 침투 유입량 대비 최대 방류량 기준의 홍수 저감율이 평균 72.5 %인 것으로 분석되었다. 특히, 태풍 산바 내습 시의 홍수 저감율은 82.2 %로서 매우 높게 나타났다.

<표 5>에 제시한 홍수사상을 제외한 나머지 10개의 홍수사상에 대하여 COSFIM을 이용하여 남강댐의 적절한 운영 결과를 도출하였다. COSFIM을 이용한 홍수 사후 분석에서는 가급적 상류부 침수가 유발되지 않는 범위(El. 43.0 m 이하)에서 운영하되, 홍수조절 용량을 충분히 사용하도록 하였다.

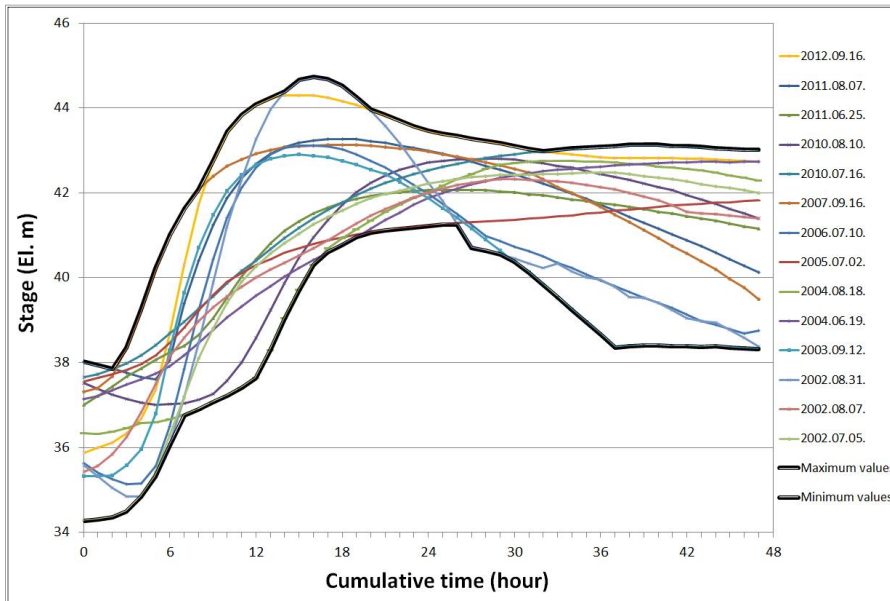
<Table 5> 남강댐의 효과적인 홍수조절 사례

홍수사상	홍수조절			남강댐 수위 변화(El. m)		
	침투 유입량 (m³/s)	최대 방류량 (m³/s)	홍수 저감 비율(%)	사전 방류에 의한 최저 수위(c)	최고 수위 (d)	수위 차이 (d)-(c)
2012.09.16.~09.17.	14,101	2,512	82.2	35.76	44.30	8.54
2011.08.07.~08.08.	10,648	2,482	76.7	37.61	43.27	5.66
2011.06.25.~06.26.	5,711	2,195	61.6	36.22	42.07	5.85
2010.08.10.~08.11.	5,846	1,780	69.6	37.01	42.80	5.79
평균			72.5			6.46

2. 남강댐 운영의 상·하한 경계 결정

남강댐 운영의 상·하한 경계를 추정하기 위해 <표 5>의 실제 댐 운영 결과와 사후 분석 결과를 이용하였다. 즉, 14개의 홍수사상에 대하여 적절하게 수행된 댐 운영의 결과를 이용하여 12mm/hr의 유

역 평균 강우량을 초과한 시점을 기준으로 누가시간에 대한 남강댐의 수위를 도시하였다. 그리고 각 누가시간에 대한 최대값과 최소값을 연결하였다. 이때 최대값 시계열 곡선은 댐의 안전과 댐의 상류부에 위치한 지장물의 침수 방지를 위한 운영 수위의 결정에 활용되고, 최소값 시계열 곡선은 효과적인 홍수조절을 달성하기 위한 댐 최저 운영 수위의 설정에 사용된다(<그림 4>).

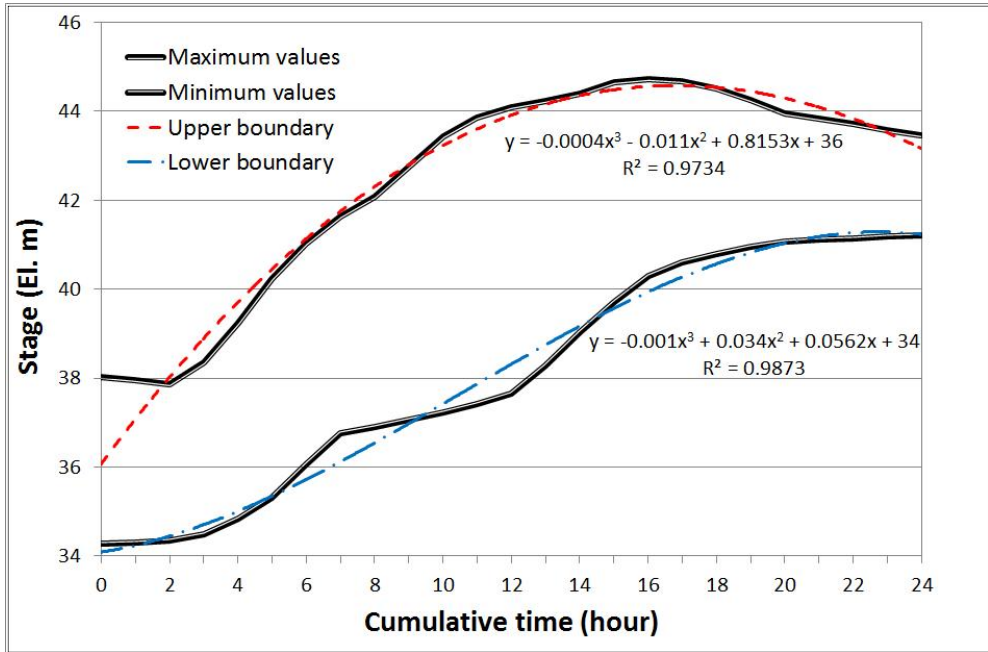


<그림 4> 남강댐의 홍수 시 최대 및 최소 수위 시계열 곡선

<그림 4>의 최대값 및 최소값 시계열 곡선을 실제 댐 운영에 반영하기 위해서는 두 가지 사항을 고려할 필요가 있다. 첫 번째는 초기의 예비 방류를 통한 남강댐의 운영 수위이다. 남강댐 관리단은 남강댐의 홍수조절 효과를 증대시키기 위해 예비 방류를 통해 홍수 초기의 수위를 El. 35.0m까지 낮추는 것으로 계획하고 있다. 이에 본 연구에서는 남강댐의 초기 수위를 El. 34.0m~36.0m에서 유지하도록 기준을 제시하였다. 두 번째는 홍수 지침 곡선이 댐 운영에 잘 활용되기 위해서는 전체 댐 운영 기간 동안 곡선의 형태가 연속적이고 매끄러울 필요가 있다. 이에 연구에서는 최대값 및 최소값 시계열 곡선의 회귀식을 산정하였다. 이때, 회귀식은 24시간까지만 산정하였다. 그 이유는 댐의 홍수조절은 첨두 유량을 제어하는데 목적이 있고, 첨두부 이후의 기간은 댐 운영자의 판단에 따라 수위가 조절되기 때문이다. 실제로 <그림 4>에서 첨두부 이후의 댐 운영은 상대적으로 편차가 매우 큰 것을 볼 수 있다. 이에 따라 <그림 4>의 최대값 및 최소값 시계열 곡선에서 첨두부 이후의 기간을 포함하여 회귀식을 산정할 경우 양호한 결과를 얻을 수 없다.

<그림 5>는 최대값 및 최소값 시계열 곡선의 회귀식 및 회귀곡선을 산정한 결과이다. 회귀식은 3차식으로 결정되었다. 본 연구에서는 남강댐의 최고 및 최소 수위 시계열의 회귀곡선을 각각 남강댐

운영의 상·하한 경계(boundary)로 설정하였다. 상한경계의 최대값은 약 El. 45.0m로서 계획홍수위(El. 46.0m) 이하이고, 하한경계의 최대값은 홍수기 제한수위(El. 41.0m)에 가까우므로 적절한 것으로 판단된다.

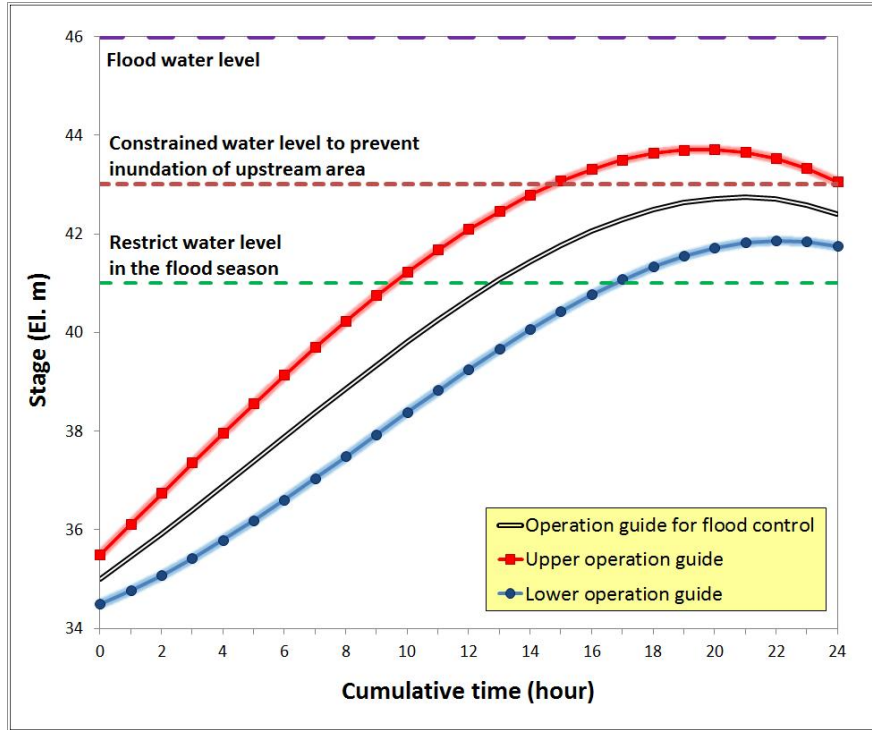


<그림 5> 남강댐의 홍수 시 최대 및 최소 수위 시계열 곡선

3. 남강댐 홍수 지침 곡선의 결정

홍수 지침 수위(operation guide for flood control)는 전 절에서 추정된 상·하한 경계의 평균 수위로 설정하였다. 이때, 홍수 지침 수위의 최대값은 남강댐 상류의 침수 방지를 위한 제약 수위(El. 43.0m) 이하로서 적절하게 결정된 것으로 판단된다(<그림 6>).

댐 운영자는 가급적 해당 홍수 지침 수위를 따르도록 운영하되, 홍수 지침 수위를 정확히 따르기 어려우므로 댐 수위가 가급적 특정한 범위 내에서 운영될 수 있도록 할 필요가 있다. 이에 연구에서는 상·하한 운영 수위(upper and lower operation guide)를 정의하였고, 댐의 상·하한 운영 수위는 각각 홍수 지침 수위와 상·하한 경계의 평균값으로 결정하였다. 즉, 본 연구에서 제안하는 남강댐 홍수 지침 곡선은 <그림 6>과 같이 홍수 지침 수위와 상·하한 운영 수위를 포함한다.



<그림 6> 남강댐의 단기 홍수 지침 곡선

V. 결론

남강댐 운영자는 남강댐 유역의 지형적·기상학적 특징과 남강댐의 구조적 문제로 인해 매년 홍수 조절에 어려움을 겪고 있다. 이에 본 연구에서는 남강댐의 홍수 시 효과적인 홍수조절을 위한 단기 홍수 지침 곡선의 적용을 제안하였다.

남강댐의 단기 홍수 지침 곡선은 홍수 지침 곡선의 적용 시점을 설정하고, 남강댐 운영의 지침 수위 및 상·하한 운영 수위의 설정을 통해 결정되었다. 이를 위해 과거 남강댐 유역에서 발생한 14개의 홍수사상에 대한 수문자료의 분석과 홍수해석 프로그램인 COSFIM 모형을 활용한 남강댐의 모의 운영 결과가 활용되었다. 최종적으로 남강댐의 단기 홍수 지침 곡선을 이용한 홍수 시 실시간 운영 방안은 다음과 같다.

① 단기 홍수 지침 곡선의 활용 시점: 유역 평균 강우량이 12mm/hr를 초과하고, 계속된 강우가 예상되는 시점

② 각 누가시간에 대한 지침수위와 실시간 남강댐 수위를 비교하여 방류량 결정

i) 댐 수위가 상·하한 수위 범위 내 위치: 현행 방류 유지

ii) 댐 수위 < 댐 운영 하한 수위: 방류 억제(홍수 조절 목적)

iii) 댐 수위 > 댐 운영 상한 수위: 방류 증가(댐 상류의 침수 방지 및 댐 안전 목적)

본 연구에서 제안한 남강댐의 단기 홍수 지침 수위는 상류부에 위치한 지장물의 침수문제와 남강댐의 구조적 안전을 도모하는 동시에 불필요한 하류 방류를 제어하여 남강댐의 효과적인 홍수조절에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bae, M. S. 2008. *A Runoff Analysis by Kriging Method for the Nam River Dam Basin*. M.Sc. thesis, Gyeongsang National University, Jinju, Korea.
- Cheng, C. T. and K. W. Chau. 2001. Fuzzy Iteration Methodology for Reservoir Flood Control Operation. *Journal of the American Water Resources Association*. 37(5): 1381-1388.
- Cheng, C. T., W. C. Wang, D. M. Xu, and K. W. Chau. 2008. Optimizing Hydropower Reservoir Operation Using Hybrid Genetic Algorithm and Chaos. *Water Resources Management*. 22(7): 895-909.
- Hsu, N. S. and C. C. Wei. 2007. A Multipurpose Reservoir Real-time Operation Model for Flood Control During Typhoon Invasion. *Journal of Hydrology*. 336: 282-293.
- Jung, I. K., S. J. Kim, J. H. Park, and P. S. Hwang. 2007. *Development of a Distributed Rainfall-runoff Model for the Downstream Watershed of Namgang Dam*. 2007 KSCE Annual Conference, Korean Society of Civil Engineers.
- Korea Development Institute. 2009. *Redevelopment Project of Namgang Dam and Multi-Regional Water Supply System of Busan and Gyeongsangnam-do Area*. Korea Development Institute.
- Lee, E. R., J. H. Park, W. G. Kim, and P. S. Hwang. 2006. *Status of Flood Control at Namgang Dam During 2006 Rainfall*. 2006 KSCE Annual Conference, Korean Society of Civil Engineers.
- Lee, S. 2012. *Development Multi-dimensional Hydrodynamics Analysis System Connected with Lumped Model and One-dimensional Hydraulic Model*. M.Sc. thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Malekmohammadi, B., B. Zahraie, and R. Kerachian. 2010. A Real Time Operation Optimization Model for Flood Management in River: reservoir Systems. *Natural Hazards*. 53(3): 459-482.
- Needham, J. T., W. W. J. David, and R. L. Jay. 2000. Linear Programming for Flood Control in the Iowa and Des Moines Rivers. *Journal of Water Resources Planning and*

Management. 126(3): 118 - 127.

Ngo, L. L., H. Madsen, and D. Rosbjerg. 2007. Simulation and Optimization Modeling Approach for Operation of the Hoa Binh Reservoir. Vietnam. *Journal of Hydrology*. 336: 269-281.

Reddy, M. J. and D. N. Kumar. 2006. Optimal Reservoir Operation Using Multi-objective Evolutionary Algorithm. *Water Resources Management*. 20(6): 861-878.

Unver, O. L. and L. W. Mays. 1990. Model for Real-time Optimal Flood Control Operation of a Reservoir System. *Water Resources Management*. 4: 21-46.

Windsor, J. S. 1973. Optimization Model for the Operation of Flood Control System. *Water Resources Research* 9(5): 1219-1226.

강대욱: 부경대학교에서 공학 박사학위(논문: 적응 벌칙함수와 집합체 혼합진화 기법의 결합 및 유역유출 모형의 매개변수 추정에 대한 적용, 2013)를 취득하고, 현재 K-water 연구원의 위촉선임연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 도시 홍수, 수자원 문제에 대한 최적화 기법의 적용 등이고, 주요 논문으로는 “Modification of the SCE-UA to Include Constraints by Embedding an Adaptive Penalty Function and Application: Application Approach(2014),” “유역유출 및 수질모의에 관한 SWMM의 자동 보정 모듈 개발(2014)” 등이 있다 (ktw62@kwater.or.kr).

이상진: 부산대학교에서 공학 박사학위(논문: 洪水流出을 考慮한 小河川 河口閉塞 防止工法에 關한 研究, 2002)를 취득하고, 현재 K-water 연구원의 책임연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 수자원계획및운영, 저영향개발 (low impact development) 등이다. 주요 논문으로는 “Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum River(2014),” 등이 있다(sjlee@kwater.or.kr).

최선호: 부산대학교에서 공학 박사학위(논문: 자연사빈의 단기간 지형변동에 관한 연구, 1997)를 취득하고, 현재 창신대학교 건설플랜트 공학과 교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 하천의 홍수예방 시스템, 하천제방의 친환경 적인 조성방안, 하천지형 변동에 고찰에 관한 연구 등이다. 주요 논문으로는 “하천의 장기 지형변화 고찰 및 하상 변동모의” 등이 있다(csh@cs.ac.kr).