韓國水資源學會論文集
第42卷 第7號 · 2009年 7月
pp. 559~569

DOI: 10.3741/JKWRA.2009.42.7.559

설계빈도변화를 고려한 천변저류지 최적위치 선정

Determination of Optimal Location of Washlands Considering Design Frequency

백 천 우* / 안 태 진**

Baek, Chun Woo / Ahn, Tae Jin

Abstract

Due to environmental, economical and the other limitations, it has been more difficult to construct new large hydraulic structure such as dam. For this reason, it has been tried to use small hydraulic structure such as washland as alternative of hydraulic facility. Because the flood control effect of small hydraulic structure are affected by runoff volume, hydrograph, storage capacity and weir crest elevation, and design frequency must be predetermined for the design of the hydraulic structure. Multiple washlands will be required to satisfy enough peak reduction effect so that considering washlands as a network, rather than individually, are critical to analysis of flood reduction effect. In this study, new index for determination of optimal location for washlands is presented and the existing model for this determination is modified by adopting the new index. Developed new model is applied to Ansung river basin for examination and the new model shows its' applicability as a decision making criteria for the determination of optimal location for washlands.

keywords : Washland, Optimal Location, Decision Making Model, Design Frequency

요 지

환경 및 경제적 문제 등으로 인해 댐과 같은 대규모 수공구조물의 신설이 점차 어려워짐에 따라, 천변저류지 등과 같은 소규모 수공구조물의 설치가 대안으로 검토되고 있다. 천변저류지와 같은 소규모 수공구조물의 경우 홍수량, 유입수문곡선, 천변저류지 용량 및 월류위어의 월류고 등에 따라 홍수저감효과가 민감하게 반응하므로, 대상 저류지의 제원 결정을 위해 목표하는 설계빈도 결정이 선행되어야 한다. 또한 천변저류지를 이용하여 목표하는 홍수저감효과를 얻기 위해 다수의 천변저류지가 설치되어야 하며, 즉 천변저류지군의 홍수조절효과는 이들 저류지군을 연계한 수문네트워크의 분석에 의해 산정되어야 한다. 본 연구에서는 설계빈도 변화에 따른 천변저류지군의 홍수저감효과를 산정해 보았으며 산정된 홍수저감효과를 분석하여 천변저류지의 최적위치를 선정하기 위한 새로운 지수를 제안하였다. 천변저류지의 최적위치를 결정하기 위해 개발된 기존의 의사결정모형을 보완하여 제안된 지수를 산정하기 위한 모형을 개발하였으며, 개발된 모형을 안성천유역에 적용하여 기존의 연구결과와 비교하고, 적용성을 검토하였다. 그 결과 천변저류지 최적위치를 결정하기 위한 기준으로의 활용이 가능한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 천변저류지, 최적위치, 의사결정모형, 설계빈도

* Univ. of Western Australia, School of Envir. Systems Eng., 연구원
Research Associate, School of Envir. Systems Eng., Univ. of Western Australia, WA 6009, Australia
** 교신저자, 한경대학교 공과대학 토목공학과 교수
Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil Eng., Hankyong National Univ., Ansung 456-749, Korea
(e-mail: ahntj@hknu.ac.kr)

1. 서 론

기후변화로 인한 계획홍수 상승과 가속화되는 도시화, 산업화는 홍수피해 증가의 위험성을 증가시키고 있으나, 정치, 경제 및 환경파괴 등과 같은 다양한 이유로 인해 댐과 같은 대규모 수공구조물의 신설이 점차 어려워지고 있다. 그 결과 소규모 수공구조물을 이용한 홍수저감 방안에 대한 필요성이 점차 증가하고 있으며, 실제 최근 수립된 국내의 유역종합치수계획에서는 유역 내에서 홍수량을 분담시키는 형식으로 홍수량을 저감시키는 천변저류지의 도입을 검토하고 있으며 관련된 연구가 진행 중에 있다.

규모가 작은 천변저류지는 대상 유역 내에 다수의 설치후보지가 존재할 수 있으며, 이 중 어느 후보지를 천변저류지로 사용할 가를 결정하는 문제는 천변저류지 계획에 있어 중요한 문제이다. 천변저류지의 최적위치를 결정하는 의사결정문제의 해를 얻기를 위해서는 홍수저감효과, 경제성분석 등과 같은 다양한 사항들이 고려되어야 하나, 현재 국내에서는 경제성분석을 위한 관련자료 부족 등으로 인해 천변저류지의 홍수저감효과가 의사결정문제의 가장 중요한 기준으로 사용되고 있다.

저류지(retention pond), 유수지(detention pond) 및 천변저류지(washland) 등과 같은 소규모 수공구조물을 단독으로 설치할 경우 목표하는 홍수저감효과를 얻기 어려울 수 있으며, 대상유역 내에 다수를 설치할 필요가 빈번하게 발생한다. 하지만 소규모 수공구조물은 홍수량, 유입수문곡선, 저류지 용량 및 월류부 특성 등에 따라 홍수저감효과가 민감하게 반응하므로, 저류시설군의 홍수조절효과를 산정할 경우 단일 저류시설의 홍수조절효과 산정 시와는 다른 접근방법이 필요하다. Kamedulski and McCuen (1979), Ormsbee *et al.* (1984) 및 Travis and Mays (2008) 등은 저류지 및 유수지 등과 같은 저류시설을 홍수조절을 위해 이용할 경우 저류시설이 설치된 유역의 첨두홍수량을 낮추고 첨두홍수 도달시간을 지체시킬 수는 있으나, 이로 인해 저류시설을 통과한 이후의 유역에 첨두홍수 증가를 유발하여 큰 피해를 줄 수 있으며, 따라서 유역전반에 대한 소규모 저류시설군의 홍수조절효과는 저류시설군을 연계한 수문네트워크의 분석에 의해 산정되어야 한다고 지적하였다. 특히 대상유역 내에 다수의 설치가능 후보지가 존재하는 천변저류지의 경우, 대상 후보지의 천변저류지 설치여부에 따라 다양한 계획안 수립이 가능해진다. 즉 이들 계획안에 대한 수문네트워크 분석에 의해 홍수조절효과 산정이 선행되어야 하며, 이를 바탕으로 최적의 효과를 얻기 위한 천변저류지 최적위치가 선정되어야 한다(안태진 등, 2008).

수문네트워크의 분석에 의한 천변저류지의 홍수저감효과 산정방법은 크게 수리학적 접근방법과 수문학적 접근방법으로 구분할 수 있다. 수리학적 접근방법을 이용할 경우 유입수문곡선변화와 같은 시간 항을 고려하기 위해 부정류해석(unsteady analysis)이 필수적이며, 건설교통부(2005), 한건연 등(2005), 전경수 등(2006), 박창근 등(2007) 등, 강수만 등(2007) 및 김덕길 등(2008)은 HEC-RAS의 부정류모의 기능 등과 같은 수리학적 접근 방법에 의해 천변저류지의 홍수저감 효과를 산정하였다. 그러나 부정류해석을 이용한 수리학적 접근방법은 고려해야할 경우의 수가 많은 경우 많은 모의시간이 소요되거나 해를 주지 못하는 단점이 있어 분석에 한계가 있다(안태진 등, 2008; 백천우 등, 2009). 이와 같은 수리학적 방법의 단점 때문에 Yeh *et al.*(1997), 안태진 등 (2008) 및 백천우 등 (2009)은 저류지군의 최적위치와 규모를 결정하기 위해 수문학적 접근방법을 이용하였으며, 수문학적 접근방법은 수리학적 접근방법보다 모의시간이 매우 적은 장점이 있다.

천변저류지의 최적위치 선정과 관련된 연구로는 건설교통부(2005), 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)의 연구가 있으며 이들 연구에서는 수리학적 방법 또는 수문학적 방법에 의해 산정된 홍수저감효과를 기준으로 천변저류지의 최적위치를 결정하였다. 전술한 바와 같이 소규모 수공구조물은 홍수량, 유입수문곡선, 저류지 용량 및 월류부 특성 등에 따라 홍수저감효과가 민감하게 반응하며, 이를 고려하기 위해 백천우 등(2009)의 연구에서는 천변저류지의 월류고의 변화에 따른 홍수저감효과 분석을 수행하였다. 하지만 천변저류지로 유입되는 홍수량 변화에 의해 천변저류지의 홍수조절효과에 차이가 있을 것임이 확실함에도 불구하고 기존에 수행된 연구들에서는 특정 설계빈도에 해당하는 수문자료만을 이용하여 천변저류지의 최적위치를 결정하였다. 그러나 천변저류지의 저수용량이 적은 관계로 목표하는 설계빈도에 따라 홍수저감효과가 크게 변하므로, 홍수저감효과를 천변저류지 최적위치 결정에 사용하기 위해서는 월류부 특성 변화는 물론이고 다양한 홍수사상에 대한 천변저류지의 홍수저감효과 분석이 선행되어야 할 것이며, 이를 바탕으로 최적의 천변저류지 위치를 결정해야 할 것이다.

본 연구에서는 다양한 홍수사상에 대해 결정된 천변저류지의 최적위치 선정결과를 통합적으로 분석하기 위해한 새로운 지수를 제시하였다. 새롭게 제안한 지수는 특정 설계빈도를 대상으로 결정된 천변저류지 최적위치 선정결과를 분석하여 천변저류지의 상대적 중요도를 산

정하며, 최종적인 최적위치는 상대적 중요도 지수에 의해 결정된다. 본 연구에서 제안된 지수를 산정하고, 이를 바탕으로 천변저류지의 최적위치를 결정하기 위해 기존에 개발된 백천우 등(2009)의 의사결정모형을 보완한 모형을 개발하였다. 개발된 모형을 안성천유역에 적용하여 설계빈도변화에 따른 천변저류지의 홍수저감효과를 산정하였으며, 이를 바탕으로 천변저류지의 최적위치를 결정하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

2. 천변저류지 최적위치 선정 모형의 기본 알고리즘

2.1 천변저류지의 홍수조절효과 산정

천변저류지는 크게 'on-line'과 'off-line'형식으로 구분할 수 있다. 저류용량이 적은 천변저류지의 경우 저류효과에 의해 첨두홍수량을 감소시키는 'on-line'형식보다는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 하천변 제내지에 일정 공간을 확보하여, 제방의 일부분을 낮추어서 홍수시 하천이 일정수위 이상 되면 물을 저류지로 배수시키고, 홍수가 종료되면 저류지에 배수된 물을 수문 등을 통해 하천으로 되돌리는 횡월류위어 방식으로 홍수를 조절하는 'off-line'형식이 천변저류지에 보다 적합하다(건설교통부, 2005).

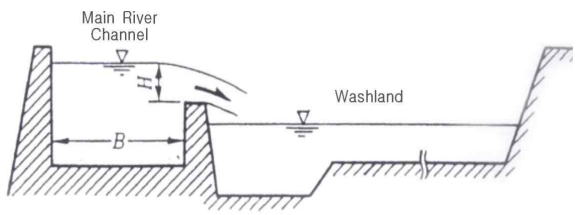

Fig. 1. Structure of Lateral Weir of Washland

횡월류위어를 통한 월류유량산정은 다음 Eq. (1)과 같은 횡월류유량공식을 사용하여 산정할 수 있다.

$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2} \tag{1}$$

Eq. (1)에서 Q는 횡월류 분기유량(천변저류지 유입유량), C는 weir계수, L은 월류부 폭 및 H는 월류부 수심을 의미한다. Eq. (1)은 주하천수로의 수면과 월류부상단이 평행한 경우 적용할 수 있으며, 월류부 폭 L이 상대적으로 넓어 수면과 월류부상단이 평행하지 않을 경우에는 다음 Eq. (2)와 같은 Hager의 횡월류유량공식(Hager, 1987)을 사용하여 weir계수를 산정 할 수 있다.

$$C = \frac{3}{5} C_0 \sqrt{g} \left[\frac{1-W}{3-2y-W}\right]^{0.5} \left\{1-(\beta+S_0)\left[\frac{3(1-y)}{y-W}\right]^{0.5}\right\} \tag{2}$$

$$W = \frac{h_w}{H_t + h_w},\ y = \frac{H+h_w}{H_t+h_w}$$

Eq. (2)에서 H는 월류부 수심, h_w는 주수로하부에서 위어상단까지의 높이, H_t는 위어상단에서 에너지경사선까지의 높이, S_0는 주수로부 경사, β는 주수로의 축소각 및 C_0는 위어형상 계수를 의미한다. 본 연구에서는 횡월류부에서의 수면과 월류부 상단이 평행하다고 가정하여 USACE (2008)가 추천한 1.11을 횡월류계수 C값으로 적용하였다.

2.2 수문학적 접근방법에 의한 수문네트워크분석

Kamedulski and McCuen (1979), Ormsbee *et al.* (1984) 및 Travis and Mays (2008) 등이 지적한 것과 같이 유역내에 위치하는 소규모 저류시설군의 홍수조절효과는 저류시설군을 연계한 수문네트워크의 분석에 의해 산정되어야 한다. 소규모 저류시설의 경우 시간에 따른 유입수문곡선 변화에 따라 홍수저감효과가 민감하게 반응하므로, 부정류 해석이 필수적인 수리학적 접근방법을 이용할 경우 장시간의 분석시간이 소요된다. 특히 고려해야할 경우의 수가 증가할 경우 분석에 한계가 있을 수 있으며, 수문학적 접근방법의 필요성이 증가하게 된다. Yeh *et al.*(1997)은 다수 저류지군의 최적위치와 월류위어의 제원을 결정하기 위해 HEC-1모형과 유전자알고리즘을 연계한 모형을 개발하였으며, 국내에서는 천변저류지의 최적위치를 결정하기 위해 수문학적 접근방법과 유전자 알고리즘을 연계한 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)의 연구가 있다.

안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)은 HEC-HMS를 이용해 각 소유역별 유출수문곡선만을 산정하고, 천변저류지 설치 여부에 따라 수문곡선이 변하는 하도추적, 저수지 추적, 유역합류 및 분기 등의 과정은 HEC-HMS에서 사용된 Muskingum method와 Muskingum-Cunge method 등의 기법을 별개의 모듈로 프로그램하여 홍수저감효과를 산정하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 천변저류지의 위치에 따라 발생하는 홍수저감효과 및 하도추적, 유역합류 등의 과정에만 계산시간이 사용되므로 다양한 경우에 대한 분석시간을 감소시키는 장점이 있어, 천변저류지 설치 조합에 따라 다양하게 변하는 수문현황 분석에 용이한 방법이다. 본 연구에서는 수문학적 접근방법을 이용하여 수문네트워크를 분석하였으며, 본 연구에서 이용한 수문네트워크분석과정을 정리하면 다음과 같다. 우선 소유역, 하도, 저수지, 천변

저류지 등과 같이 대상유역을 구성하는 요소들의 상호 연계를 고려하여 대상유역의 구조를 확정한다. 다음은 HEC-HMS를 이용하여 대상유역내 소유역의 유출수문곡선을 계산하고, 계산된 소유역 유출수문곡선을 이용하여 하도추적, 하도분기 및 합류 등의 과정을 상류부터 하류방향으로 순차적으로 수행한다. 천변저류지 지점을 통과할 경우, 천변저류지 지점의 유입수문곡선과 Eq. (1) 및 (2)와 같은 횡월류유량공식을 이용하여 천변저류지 지점을 통과한 이후의 유출수문곡선을 계산한다. 이와 같은 과정을 이용하여 홍수저감목표지점 및 유역출구에서의 유출수문곡선을 계산한다. Fig. 2는 이와 같은 수문네트워크분석과정을 나타내고 있다.

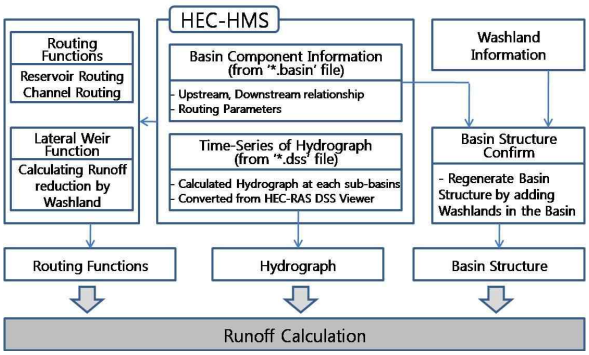

Fig. 2. Runoff Calculation Process

2.3 천변저류지 최적위치 선정

천변저류지는 규모가 다른 저류시설에 비해 작아 유역 내 설치가 가능한 다수의 후보지가 존재하며, 다수의 후보지를 적절히 조합하여 운영할 경우 홍수저감을 비롯한 많은 효과를 기대할 수 있을 것이다. 그러나 예산 등과 같은 제약으로 인해 실제 설치가 가능한 위치와 그 규모에는 한계가 있을 것이며, 주어진 예산안에서 최대의 효과를 나타내는 최적의 위치와 규모의 결정은 천변저류지 설치계획을 위해 수행되어야 한다. 특히 천변저류지는 홍수기 홍수저감효과 이외에 비홍수기 습지와 농지 등으로 활용할 수 있어, 하절기에 대부분의 강수가 집중되고 있는 국내의 경우, 비홍수기 활용적 측면에서 보유하고 있는 잠재적 가치가 큰 저류시설이다. 즉 유역내 천변저류지 설치를 계획할 경우, 홍수저감효과를 비롯한 경제성분석결과, 습지와 농지 등으로 활용될 경우 발생하는 가치 등과 같은 천변저류지의 다양한 기능과 가치를 고려하여야 한다.

그러나 현재 국내에서는 첨두홍수량 감소로 인한 홍수피해액 감소, 습지와 농지 등으로 활용될 경우 발생하는 가치 등과 같은 천변저류지 설치로 인해 발생하는 다양한 이익 등을 정량화하기 위한 기준과 자료가 부족한 실정이다. 이와 같은 이유로 건설교통부(2005), 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)에 의해 수행된 기존의 국내 연구에서는 첨두홍수감소량만을 천변저류지의 최적위치 선정을 위한 기준으로 사용하였다. 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)은 천변저류지군의 수문네트워크 분석에 의해 홍수저감량을 산정하였으며, 특히 유역출구에서의 홍수저감량은 물론이고, 토지이용현황, 과거 침수피해현황 등을 고려한 '홍수저감목표지점(Target Point)'의 개념을 도입하여 천변저류지의 규모와 위치 선정을 위한 기준으로 사용하였다. Eq. (3) 및 Eq. (4)는 대상 유역 내에 천변저류지로 사용이 가능한 후보지가 w개 있고 이 중 m개의 후보지에 천변저류지를 설치할 경우($m \le w$), 천변저류지의 최적위치 및 규모선정을 위해 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)이 사용한 적합도 함수를 나타내고 있다.

$$Maximize B = \sum_{i=1}^{n} x^i = \sum_{i=1}^{n} \Delta Q_p^i = \sum_{i=1}^{n} (Q_{p_{Before}}^i - Q_{p_{After}}^i) \quad (3)$$
$$subject \quad to \quad V_j \leqq V_j^{\max} \quad for \quad j = 1, \cdots, m$$

$$Maximize\, B = x^{outlet} = \Delta Q_p^{outlet} = Q_{p_{Before}}^{outlet} - Q_{p_{After}}^{outlet} \quad (4)$$
$$subject \quad to \quad V_j \leqq V_j^{\max} \quad for \quad j = 1, \cdots, m$$

여기서, x_i는 유역내 홍수저감목표지점 i의 홍수저감량(ΔQ_p^i), $Q_{p_{Before}}^i$는 홍수저감목표지점 i의 천변저류지 설치 전의 첨두홍수량, $Q_{p_{After}}^i$는 홍수저감목표지점 i의 천변저류지 설치 후의 첨두홍수량, x_{outlet}은 유역출구에서의 홍수저감량(ΔQ_p^{outlet}), $Q_{p_{Before}}^{outlet}$는 유역출구에서의 천변저류지 설치 전의 첨두홍수량, $Q_{p_{After}}^{outlet}$는 유역출구에서의 천변저류지 설치 후의 첨두홍수량, n은 홍수저감목표지점의 수, V_j는 천변저류지를 설치하는 후보천변저류지의 용량, $V_j^{\max}$는 천변저류지를 설치하는 후보천변저류지의 최대용량을 의미한다.

안태진 등(2008)은 Eq. (3) 및 Eq. (4)와 같은 목적함수를 만족하는 천변저류지의 조합을 유전자 알고리즘을 이용하여 탐색하는 모형을 개발하였다. 백천우 등(2009)은 안태진 등(2008)의 모형에 월류고 값을 결정변수로 추가하여 천변저류지의 최적위치 및 최적 월류고를 동시에 산정하는 모형을 개발하였다. 이들 연구에서는 안성천 유역에 개발된 모형을 적용하여 100년 빈도 홍수사상에 대한 천변저류지의 최적 제원을 결정하였다. 그러나 저수용량이 적은 천변저류지의 홍수저감효과는 목표하는 설계빈도에 의해 영향을 받을 것이며, 홍수저감효과를 천변저류지 최적위치 결정에 사용하기 위해서는 다양한 홍수사상에 대한 천변저류지의 홍수저감효과 분

석이 선행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 설계빈도 변화를 고려한 천변저류지 최적 위치 및 제원 선정을 위해 백천우 등(2009)이 개발한 모형을 수정 보완한 모형을 개발하였다.

안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)의 연구에서와 같이 w개의 후보지에서 m 개의 천변저류지를 선정할 경우($m \le w$), 몇 개의 천변저류지를 설치할 것인가를 나타내는 변수 m의 결정이 의사결정모형의 최종결과에 영향을 미칠 것이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 영향을 최소화하기 위해 천변저류지 후보지의 상대적 중요도를 RSI (Relative Significance Index)라 정의하여 천변저류지 최적위치 결정을 위한 기준으로 사용하였다.

특정 설계빈도에 대해 w개의 후보지에서 m 개($m \le w$)의 천변저류지를 선택하는 의사결정문제에서, 저류지 k는 최대 w번까지 선택되어 질 기회가 있다. 적용하는 설계빈도의 수를 NE (Number of Event)라 하고 적용설계빈도 수를 고려할 경우 저류지 k가 선택될 수 있는 모든 경우의 수 를 $TNPC$ (Total Number of Possible Case)라 정의하면, $TNPC$ 모든 저류지에 대해 동일한 값을 가지며 다음 Eq. (5)와 같이 산정된다.

$$TNPC = w \times NE \tag{5}$$

특정 설계빈도 r에 대하여 w개의 후보지에서 m 개($m \le w$)의 천변저류지를 선택하는 의사결정문제에서 천변저류지 후보지 k가 선택된 횟수를 NS_{k_r} (Number of Selected)라 정의하고, 천변저류지 후보지 k가 적용되는 전체 설계빈도 NE에 대해서 선택되는 횟수를 TNS (Total Number of Selected)라 정의하면, 천변저류지 k의 TNS_k는 다음 Eq. (6)에 의해 산정할 수 있다.

$$TNS_k = \sum_{r=1}^{NE} NS_{k_r} \tag{6}$$

정의한 천변저류지 후보지 k의 상대적 중요도 RSI_k는 다음 Eq. (7)에 의해 산정된다.

$$RSI_k = \frac{TNS_k}{TNPC} \tag{7}$$

NE개의 설계빈도와 w개의 후보지가 있는 유역에서 저류지 k의 RSI_k를 산정하는 과정은 다음과 같다. 우선 특성 설계빈도 r에 대하여 설치하는 천변저류지 수(m)을 1개에서 w개까지 증가시키며, 천변저류지 수(m)에 따른 최적 위치를 결정하고, 결정된 최적 위치를 이용하여 각 저류지 별 선택된 횟수 NS_{k_r}을 산정한다. 총 NE개의 설계빈도에 대해 산정한 각각 저류지 별 NS_{k_r}을 합하여 TNS_k를 산정하고 최종적인 상대적 중요도 RSI_k를 산정한다. Fig. 3은 본 연구에서 제안한 RSI_k를 이용하여 천변저류지 최적위치를 결정하는 의사결정모형의 구조를 나타내고 있다.

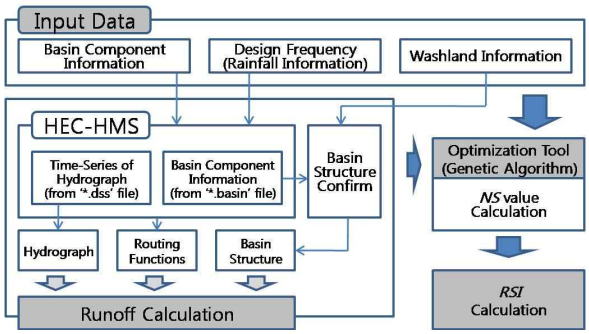

Fig. 3. Model Structure

본 연구에서 새롭게 정의한 상대적 중요도 RSI는 대상 천변저류지 후보지가 천변저류지의 최적위치를 결정하기 위한 의사결정문제에서 얼마나 많이 선택되는가를 의미한다. 설계빈도 조건, 설치할 천변저류지 수의 변화 등과 같이 의사결정을 위한 다양한 조건들을 고려할 때, 자주 선택되는 천변저류지 후보지는 유역전체의 홍수저감 측면에서 그만큼 중요하다는 것을 의미하며, 의사결정자는 산정된 상대적 중요도 RSI를 바탕으로 최적의 천변저류지 위치 선택이 가능할 것이다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역 및 천변저류지 후보지 현황

안성천 유역의 면적은 1,658 km^2이며 하천의 총 연장은 지천을 포함하여 총 103개 하천의 605 km이다. "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서는 대상유역을 208개의 소유역과 109개 하도구간으로 구분하였으며, HEC-HMS 모형을 이용하여 홍수량을 산정하였다. 또한 소규모 수공구조물 설치를 통한 홍수저감 방안을 검토하기 위해 Fig. 4에 나타난 것과 같이 13개 지점에 대한 천변저류지 설치를 검토하였으며, HEC-RAS의 부정류 해석 기능을 이용하여 천변저류지의 홍수저감량을 산정하고, 천변저류지 직하류부 홍수저감량을 기준으로 천변저류지 설치 위치를 결정하였다. 안태진 등(2008) 및 백천우 등(2009)은 천변저류지 최적위치 결정을 위해 개발한 모형을 안성천 유역에 적용하여

Table 1. Characteristics of Washland in Ansung Basin

Washland ID	Name of Washland	Area (km^2)	Max. Storage Capacity (m^3)	Top El. of Weir (m)	Width of Weir (m)	Rating Curve applied
W1	Pyungkoong	0.21	575,000	6.50	30	$H=0.411\times Q^{0.379}$
W2	Shinka	1.64	2,784,000	7.60	75	$H=1.605\times Q^{0.222}$
W3	Joongbok	2.06	3,543,000	8.50	75	$H=2.487\times Q^{0.183}$
W4	Yangryung	0.77	1,362,000	10.49	100	$H=3.825\times Q^{0.145}$
W5	Keonchun	0.99	1,060,000	12.70	75	$H=6.047\times Q^{0.109}$
W6	Shinkye	0.67	297,000	14.30	100	$H=6.613\times Q^{0.106}$
W7	Doongchung	1.02	4,151,000	5.50	50	$H=0.133\times Q^{0.496}$
W8	Bekbong	0.56	2,240,000	5.50	30	$H=0.151\times Q^{0.481}$
W9	Uhyeon	1.05	4,662,000	6.00	70	$H=0.203\times Q^{0.449}$
W10	Moonkok	1.56	7,909,000	7.00	200	$H=0.284\times Q^{0.415}$
W11	Hoihwa	1.47	3,293,000	9.00	70	$H=1.439\times Q^{0.254}$
W12	Shinri	1.30	2,015,000	13.60	70	$H=8.321\times Q^{0.074}$
W13	Madoo	2.20	8,976,000	7.70	70	$H=0.642\times Q^{0.377}$

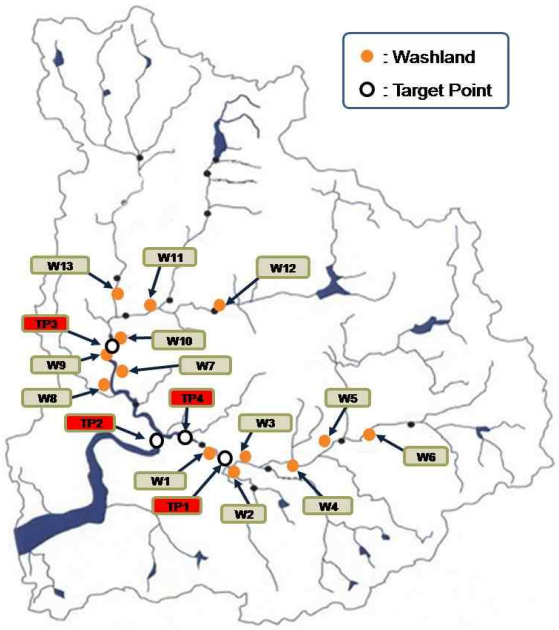

Fig. 4. Ansung River Basin

100년빈도 홍수사상에 대한 천변저류지 최적의 위치를 저류지 설치 수에 따라 결정하였다. Table 1에는 “안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)”에서 검토한 13개 저류지의 제원이 나타나 있으며, 본 연구에서는 13개 천변저류지의 상대적 중요도 RSI를 산정하여 천변저류지의 최적위치를 산정해 보았다.

3.2 적용결과

금회 분석에서는 50, 80, 100, 150 및 200년 빈도의 5개 설계빈도를 이용하여 13개 천변저류지의 상대적 중요도 RSI를 산정하였다. 천변저류지 설치 수에 따른 최적위치 결정을 위한 적합도 함수는 ‘홍수저감목표지점 (Target Point)’에서의 홍수저감량 합을 최대로 하는 Eq. (3)을 적용하였다. 홍수저감목표지점으로는 안태진 등 (2008)의 연구와 같이 토지이용현황, 과거 침수피해 현황 등을 고려하여 안성천 상류(홍수저감목표지점1), 안성천중류(홍수저감목표지점2), 진위천(홍수저감목표지점3) 및 진위천 합류후(홍수저감목표지점4)의 4개 지점을 설정하였다. 또한 백천우 등 (2009)의 연구에서와 같이 최적화를 위한 결정변수로 천변저류지 위치와 월류고 높이를 적용하였다. 즉 기존의 월류고 값을 기준으로 $\pm 1\,m$ 값 사이에서 월류고가 자유롭게 선택되도록 모형의 입력 값을 설정하였다.

Table 2에는 5개 설계빈도에 대해 천변저류지를 1개에서 13개까지 설치할 경우 산정한 최적의 천변저류지 위치와 Eq. (3)에 의해 산정되는 홍수저감목표지점에서의 홍수저감량 합, 그리고 Eq. (4)에 의해 산정되는 유역출구에서의 홍수저감량을 비교해 나타내었다. Table 2에 나타난 것과 같이 천변저류지를 5개 지점에 설치할 때, 100년의 설계빈도에서는 신가(W2), 중복(W3), 양령(W4), 문곡(W10) 및 마두(W13)저류지가 최적의 천변저류지 위치로 선정되었으며, 이 때 유역출구에서는 669 m^3/sec, 그리고 4개 홍수저감목표지점에서는 총 2,096 m^3/sec의 홍수저감효과가 있는 것으로 모의되었다.

Table 2. Optimal Location of Washland according to Design Frequence

Design Frequency	Number of Installed Washland	Washland ID													ΔQ_p at outlet (m^3/sec)	$\sum \Delta Q_p^i$ at target points (m^3/sec)
		W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13		
50년	1													○	288	660
	2										○			○	414	1,144
	3			○							○			○	513	1,565
	4		○	○							○			○	589	1,884
	5		○	○	○						○			○	649	2,049
	6		○	○	○						○	○		○	704	2,225
	7		○	○	○	○					○	○		○	735	2,344
	8		○	○	○	○				○	○	○		○	826	2,468
	9	○	○	○	○	○				○	○	○		○	845	2,510
	10	○	○	○	○			○		○	○	○	○	○	893	2,506
	11	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○		○	956	2,640
	12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	968	2,679
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	964	2,721
80년	1													○	291	668
	2										○			○	429	1,171
	3			○							○			○	531	1,595
	4		○	○							○			○	596	1,915
	5		○	○	○						○			○	668	2,084
	6		○	○	○					○	○			○	814	2,262
	7		○	○	○					○	○	○		○	844	2,423
	8		○	○	○	○				○	○	○		○	878	2,557
	9	○	○	○	○	○		○		○	○			○	976	2,552
	10		○	○	○	○		○	○	○	○	○		○	1,027	2,719
	11	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○		○	1,053	2,773
	12	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	1,054	2,839
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1,077	2,892
100년	1										○				219	668
	2										○			○	423	1,177
	3			○							○			○	531	1,602
	4		○	○							○			○	598	1,928
	5		○	○	○						○			○	669	2,096
	6		○	○						○	○	○		○	822	2,295
	7		○	○	○					○	○	○		○	882	2,468
	8		○	○	○			○		○	○	○		○	988	2,586
	9		○	○	○	○		○		○	○	○		○	1,022	2,719
	10		○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	1,042	2,814
	11		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	1,096	2,878
	12		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1,115	2,925
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1,135	2,966
150년	1													○	291	674
	2										○			○	437	1,183
	3			○							○			○	533	1,609
	4		○	○							○			○	624	1,932
	5		○	○						○	○			○	839	2,171
	6		○	○						○	○	○		○	872	2,359
	7		○	○	○					○	○	○		○	919	2,543
	8	○	○	○	○			○		○	○			○	1,035	2,563
	9		○	○	○	○		○		○	○	○		○	1,088	2,831
	10		○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	1,101	2,913
	11		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	1,175	2,989
	12	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	1,139	2,982
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1,208	3,079
200년	1										○				224	674
	2										○			○	428	1,184
	3			○							○			○	530	1,614
	4		○	○							○			○	627	1,944
	5		○	○						○	○			○	851	2,197
	6		○	○						○	○	○		○	905	2,398
	7		○	○	○					○	○	○		○	945	2,583
	8		○	○	○	○		○		○	○			○	1,078	2,690
	9		○	○	○	○		○		○	○	○		○	1,136	2,877
	10		○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	1,160	2,997
	11		○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	1,233	3,083
	12	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	1,248	3,061
	13	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1,261	3,157

Table 3. Application Result

Washland ID	Max. Storage Capacity (m^3)	NS_{i_r} for Design Frequency					TNS_k	RSI_k
		50 year	80 year	100 year	150 year	200 year		
W1	575,000	5	4	1	3	2	15	0.2308
W2	2,784,000	10	10	10	10	10	50	0.7692
W3	3,543,000	11	11	11	11	11	55	0.8462
W4	1,362,000	9	9	8	7	7	40	0.6154
W5	1,060,000	6	6	5	5	6	28	0.4308
W6	297,000	2	1	2	2	2	9	0.1385
W7	4,151,000	4	5	6	6	6	27	0.4154
W8	2,240,000	3	4	3	2	3	15	0.2308
W9	4,662,000	6	8	8	9	9	40	0.6154
W10	7,909,000	12	12	13	12	13	62	0.9538
W11	3,293,000	8	6	8	7	7	36	0.5538
W12	2,015,000	2	2	4	4	3	15	0.2308
W13	8,976,000	13	13	12	13	12	63	0.9692

Table 4. Comparison of Washland Volume vs. *RSI*

Sorted by Washland Volume				Sorted by *RSI* Value			
Ranking	Washland ID	Max. Storage Capacity (m^3)	RSI_k	Ranking	Washland ID	Max. Storage Capacity (m^3)	RSI_k
1	W13	8,976,000	0.9692	1	W13	8,976,000	0.9692
2	W10	7,909,000	0.9538	2	W10	7,909,000	0.9538
3	W9	4,662,000	0.6154	3	W3	3,543,000	0.8462
4	W7	4,151,000	0.4154	4	W2	2,784,000	0.7692
5	W3	3,543,000	0.8462	5	W9	4,662,000	0.6154
6	W11	3,293,000	0.5538	6	W4	1,362,000	0.6154
7	W2	2,784,000	0.7692	7	W11	3,293,000	0.5538
8	W8	2,240,000	0.2308	8	W5	1,060,000	0.4308
9	W12	2,015,000	0.2308	9	W7	4,151,000	0.4154
10	W4	1,362,000	0.6154	10	W8	2,240,000	0.2308
11	W5	1,060,000	0.4308	11	W12	2,015,000	0.2308
12	W1	575,000	0.2308	12	W1	575,000	0.2308
13	W6	297,000	0.1385	13	W6	297,000	0.1385

Table 3에는 5개 설계빈도를 적용하여 산정한 13개 천변저류지의 *RSI*값이 나타나 있다. Eq. (5)를 이용하여 총 13개의 천변저류지와 5개 설계빈도에 대한 *TNPC*을 산정하면 65개가 된다. 신계저류지(W6)의 경우 5개 설계빈도에 대한 최적화에서 9회 선택(*TNS*=9)되었으며, *RSI*값이 0.1385로 가장 낮은 저류지로 선정되었다. 반면 마두저류지(W13)의 경우 63회 선택(*TNS*=63)되어 최대 *RSI*값 (0.9692)을 가지는 저류지로 선정되었다.

Table 4에는 산정된 저류지 별 *RSI*값과 저류용량을 비교해 나타내었다. 전술하였듯이 *RSI*는 대상 천변저류지 후보지가 천변저류지의 최적위치를 결정하기 위한 의사결정문제에서 얼마나 많이 선택되는 가를 나타내는 지수이며, 자주 선택되는 천변저류지 후보지는 유역전체의 홍수저감 측면에서 그만큼 중요하다는 것을 의미한다. 마두저류지(W13)와 문곡저류지(W10)은 저류용량이 각각 8,976,000 m^3 및 7,909,000 m^3으로 13개 저류지 중 저류용량이 가장 큰 두 개 저류지에 해당한다. 저류용량이 클수록 홍수조절효과는 일반적으로 커지며, 저류용량이 가장 큰 두 개 저류지의 *RSI*값이 높은 것은 어느 정도 예상된 결과이다. 하지만 Table 3에 나타난 것과 같이 저류용량이 세 번째로 큰 어연저류지

(W9)의 경우 *RSI*값이 0.6154로 저류용량이 어연저류지(W9)보다 작은 중복(W3)과 신가(W2) 저류지의 0.8462와 0.7692보다 낮게 산정되었다. 이는 저류용량이 크다고 해서 대상 유역에 대한 홍수조절효과가 크지만은 않다는 것을 의미한다.

본 연구에서 천변저류지 최적위치 선정을 위해 사용한 적합도함수는 홍수저감 목표지점에서의 홍수조절효과의 최대화이며, 홍수저감 목표지점의 위치, 유역의 형상, 유역의 특성 등에 의해 최적의 천변저류지 위치는 달라질 것이다. 즉 적용된 결과는 이와 동일한 결과를 나타내고 있으며, 단순히 각 저류지 별 저류용량이 위치선정에 있어 가장 큰 영향을 주는 실무에서의 방법이 개선의 여지가 있음을 알 수 있다. 또한 특정 설계빈도에 대해 천변저류지의 최적 위치를 결정한 기존의 안태진 등 (2008) 및 백천우 등 (2009)의 연구와는 달리, 다양한 설계빈도를 적용할 경우, 혹은 동일 설계빈도라 하더라도 실강우 사상과 같이 강우패턴이 변할 경우 최적의 천변저류지 위치는 변할 수 있을 것이다. 본 연구에서 제안한 상대적 중요도 지수 *RSI*는 이와 같은 설계빈도 변화에 따른 최적위치 선정결과를 분석하여 천변저류지 설치 우선순위를 제공할 수 있으며, 주어진 예산에 따라 *RSI*값이 높은 저류지부터 순차적으로 설치할 경우 유역전반에 걸치 홍수조절효과 면에서 높은 효율을 얻을 수 있을 것다. 즉 제안된 *RSI*값은 최적의 천변저류지 위치를 결정하기 위한 의사결정 기준으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

백천우 등 (2009)은 천변저류지의 위치와 월류고를 결정변수로 적용하여 최적의 위치와 월류고를 결정하는 모형을 개발하였으며, 설계빈도 100년의 홍수사상에 대한 안성천 유역의 천변저류지 최적위치와 월류고를 산정하였다. 그 결과 "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서 설정한 월류고 값보다 전반적으로 낮은 월류고 값들이 설계빈도 100년의 홍수사상에 대하여 높은 홍수조절효과를 줄 수 있는 것으로 판단하였다. 그러나 단순하게 단일빈도 홍수사상에 적용한 결과만을 이용하여 천변저류지의 월류고를 결정하는 것은 무리가 있으며, 다양한 빈도의 홍수사상에 대한 모의를 통해 최종적인 월류고 높이를 선정해야 한다고 지적하였다. Table 4에는 5개의 설계홍수사상에 대한 모의를 통해 선정된 최적의 월류고의 평균값과 기존의 "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서 적용한 월류고 값, 그리고 백천우 등(2009)의 연구에서 산정된 월류고 값을 비교해 나타내었다.

Table 5에 나타난 것과 같이 설계빈도 100년의 단일 홍수사상에 대한 월류고 값과, 50년, 80년 및 100년의 3개 설계빈도에 대해 산정한 월류고 평균값들을 분석해 보면, "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서 설정한 월류고보다는 낮은 월류고 값들이 최적의 월류고로 선정되었다. 또한 50년, 80년, 100년, 150년 및 200년빈도에 대해 산정한 월류고의 평균값도 대부분 "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"의 월류고보다 낮게 산정되었다. 이와 같은 결과는 기존의 "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서 설정한 월류고 값을 일부 낮게 조정할 경우, 홍수조절

Table 5. Comparison of Weir Crest Elevation

Washland ID	Original Weir Crest El. (Korean MOCT, 2007) (m)	Average Weir Crest El. (Baek et al., 2009) (m)	Average Weir Crest El. (m)	
			Using 50, 80, 100 year Design Frequency	Using 50, 80, 100, 150, 200 year Design Frequency
W1	**6.50**	6.60	6.41	6.61
W2	**7.60**	7.29	7.17	7.30
W3	**8.50**	8.49	8.40	8.51
W4	**10.49**	10.43	10.28	10.38
W5	**12.70**	12.66	12.52	12.61
W6	**14.30**	14.00	13.92	14.01
W7	**5.50**	4.80	4.80	4.80
W8	**5.50**	4.80	4.80	4.80
W9	**6.00**	5.30	5.30	5.30
W10	**7.00**	6.87	6.68	6.90
W11	**9.00**	8.35	8.34	8.40
W12	**13.60**	12.90	12.90	12.90
W13	**7.70**	7.65	7.41	7.64

측면에서 높은 효과를 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 더욱이 실제 저류용량이 적은 천변저류지를 이용하여 100년빈도 이상의 고빈도 홍수사상에 대한 높은 홍수조절효과를 기대하는 것은 비현실적일 수 있다. 고빈도 홍수사상에는 댐과 같은 대규모 수공구조물을 이용한 홍수조절이 필요할 것이며, 저빈도 홍수사상에 대한 홍수조절효과를 얻기 위해 천변저류지와 같은 소규모 수공구조물을 이용할 경우 실질적인 월류고 산정이 더욱 필요할 것이다.

또한 천변저류지의 분기유량은 하천수위와 월류부 상단의 표고차에 결정되므로, 본 연구에서와 같이 수문학적 접근방법에 의해 천변저류지의 홍수저감효과를 산정할 경우 천변저류지 설치지점의 수위-유량관계식이 필수적으로 필요하게 된다. 즉 실질적인 천변저류지의 홍수저감효과 산정을 위해서는 실측을 기반으로 산정한 수위-유량관계식의 적용이 필요할 것이다.

4. 결 론

저수용량이 적은 천변저류지의 홍수저감효과는 목표하는 설계빈도에 의해 영향을 받을 것이다. 본 연구에서는 다양한 설계빈도 변화를 고려한 천변저류지의 최적위치를 선정하기 위해, 천변저류지 후보지의 상대적 중요도 지수를 *RSI* 라 정의하였으며, *RSI* 산정을 위한 기법을 제시하였다. 제안된 상대적 중요지수를 이용하여 천변저류지의 최적위치를 결정할 수 있는 모형을 개발하였으며 실제 유역에 적용하여 적용성을 검토하였다.

1) 개발된 모형을 안성천유역에 적용하여 설계빈도변화에 따른 13개 천변저류지의 *RSI*를 산정하였고, 13개 저류지 중 저류용량이 가장 큰 마두저류지(W13)와 문곡저류지(W10)의 경우 *RSI*지수가 가장 큰 중요한 저류지로 결정되었다.

2) 반면, 저류용량과 대상 유역에 대한 홍수조절효과가 비례하지는 않으며, 홍수저감 목표지점의 위치, 유역의 형상, 유역의 특성 등에 의해 상대적 중요도 지수가 변하는 결과를 나타내었다. 즉 본 연구에서 제안한 *RSI*값이 최적의 천변저류지 위치를 결정하기 위한 의사결정 기준으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

3) 5개 설계홍수사상에 대한 월류고 산정결과, 기존의 "안성천수계 유역종합치수계획(건설교통부, 2007)"에서 설정한 월류고 값을 조정할 경우 홍수조절효과 면에서 높은 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단되었다.

4) 본 연구에서는 천변저류지에서의 월류유량이 횡월류부에서의 수면과 월류부 상단이 평행하다고 가정하였으나, 천변저류지 횡월류부의 월류특성에 대한 추가적인 연구를 통해 보완이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원의 건설핵심기술연구개발사업 (06건설핵심B01)의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강수만, 박민지, 김상호, 김성준 (2007) "홍수범람모형을 이용한 침수피해 저감방안 연구 : 진위천 하천구간을 대상으로."**대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제6B호, pp. 583-590.

건설교통부 (2005). **천변저류지 기본계획 수립에 관한 연구.**

건설교통부 (2007). **안성천수계 유역종합치수계획.**

김덕길, 경민수, 김상단, 김형수 (2008). "천변저류지 조성에 따른 수리·수문분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 483-489.

박창근, 박재현, 이종진 (2007). "천변저류지를 활용한 화포천 유역에서의 홍수조절능력에 관한 연구." **2007 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 331-335.

백천우, 김복천, 안태진 (2009). "월류부특성변화에 따른 천변저류지군의 홍수저감효과분석." **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제9권, 제1호, pp. 145-150.

안태진, 강인웅, 백천우 (2008). "수문학적 홍수저감효과 기반의 천변저류지 최적위치 선정을 위한 의사결정모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제7호, pp. 725-735.

전경수, 김원, 윤병만 (2006). "천변저류지 홍수조절 효과의 불확실성 분석." **2006 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 267-270.

한건연, 김지성, 백진규, 박홍성 (2005). "하천에서 천변저류지의 홍수저감효과 분석." **2005 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 233-236.

Hager, W.H. (1987). "Lateral Outflow Over Side Weirs." *Journal of Hydraulic Engineering,* ASCE Vol. 113, No. 4, pp. 491-504.

Kamedulski, G.E., and McCuen, R.H. (1979). "Evaluation of Alternatives Stormwater Detention

Policies." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 105, No. WR2, pp. 171-186.

Ormsbee, L.E., Houck, M.H., and Delleur, J.W. (1987). "Design of Dual-Purpose Detention System using Dynamic Programming." *Journal of Water Resources Planing and Management*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 471-484.

Travis, Q.B. and Mays, L.W. (2008). "Optimizing Retention Basin Networks." *Journal of Water Resources Planing and Management*, ASCE, Vol. 134, No. 5, pp. 432-439.

USACE (U.S. Army Corps of Eng.) (2008). "Modeling Lateral Structures". In HEC-RAS (Ver. 4.0) Hydraulic Reference Manual, USACE(Ed.). (8-14)-(8-18).

Yeh, C.H., and Labadie, J.W. (1997). "Multiobjective Watershed-Level Planning of Storm Water Detention Systems." *Journal of Water Resources Planing and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 336-343.

(논문번호:09-046/접수:2009.04.16/심사완료:2009.06.11)