韓國水資源學會論文集
第43卷 第6號・2010年 6月
pp. 507~516

DOI: 10.3741/JKWRA.2010.43.6.507

유역치수계획을 위한 대안수립: 영산강 유역의 사례연구

Alternatives Development for Basin-wide Flood Mitigation Planning: A Case Study of Yeongsan River Basin

이 충 성* / 심 명 필** / 이 상 원***

Yi, Choong Sung / Shim, Myung Pil / Lee, Sang Won

Abstract

The purpose of this study is to propose the alternative development method by means of determining the optimal project size from the economic viewpoint, improving the existing method depending on engineering aspects. To this end, this study defined the flood mitigation projects as the production activities carried out by inputs and outputs, and proposed the alternative development method on the basis of optimizing input and output combinations. This paper, as the case study of the proposed method, developed alternatives for the flood mitigation planning of Youngsan River Basin by determining the optimal project scale. As the result of determining optimal project size, the net benefit of the optimal alternative tended to be dependent on the net benefits of the large individual proposals. Due to such problem, the effect of relatively small individual proposals are underestimated and possibly be excluded from the optimal alternative, which may result in exclusion of the potential damaged regions protected by them from the flood mitigation project. Thus for the selective flood protection by region, individual proposals need to be categorized into the global measures and local measures according to the flood protection area.

Keywords : flood mitigation, alternatives development, optimal project size, Youngsan River Basin

요 지

본 연구는 기존에 공학적 분석에 주로 치중하였던 대안수립 방법을 개선하여 경제적 측면에서 최적사업규모를 고려하는 방법을 제시하기 위한 것이다. 이를 위해서 치수사업을 투입과 산출에 의한 생산활동으로 정의하고 투입과 산출조합들을 최적화하는 방식의 대안수립 방안을 제시하였다. 본 논문은 제시된 방법론에 대한 사례연구로서 영산강유역 치수계획을 위한 대안들을 최적사업규모 결정을 통해 수립하였다. 최적사업규모 결정 결과, 최적대안의 순편익이 대안 내의 대규모 단위사업안들의 순편익에 의해 좌우되는 경향이 나타났다. 이러한 문제로 인해 상대적으로 소규모의 단위사업안들은 그 효과가 과소평가되어 최적대안으로부터 제외될 소지가 있으며, 결과적으로 이들로부터 보호받는 잠재적 피해지역들이 치수사업에서 소외될 수 있다. 따라서 피해지역별로 선택적인 홍수방어를 위해서는 단위사업안들을 홍수방어 범위에 따라 전역적 홍수방어대책과 지역적 홍수방어대책으로 분류할 필요가 있는 것으로 사료된다.

핵심용어 : 치수, 대안수립, 최적사업규모, 영산강유역

* 교신저자, 인하대학교 수자원시스템연구소 선임연구원
Senior Researcher, Technology Consulting Center, K-water, Daejeon 306-711, Korea (e-mail: sung@inha.ac.kr)
** 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수
Prof., Dept. of Civ. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: shim@inha.ac.kr)
*** 인하대학교 경제학부 부교수
Prof., Dept. of Economics, Inha Univ., Incheon 402-751, Korea (e-mail: swlee@inha.ac.kr)

1. 서 론

치수계획에서의 대안이란 기본적으로 홍수피해를 경감시키기 위해 기술적, 경제적으로 고려 가능한 단위사업안(individual proposal)들의 집합으로서 단위사업안들을 구상하고 이들을 조합하는 과정에서 많은 수의 대안들이 수립될 수 있다. 따라서 대안을 수립할 때에는 가능한 많은 대안이 존재하고 있음을 유념하고 미시행(Do-Nothing) 대안까지 포함한 모든 가능성을 대상으로 하여야 한다. 댐 건설을 예로 들면, 댐의 입지 뿐 아니라 댐 높이와 여수로 용량 등 댐의 규모에 따른 차이도 대안으로 수립 가능하다. 또한 홍수터규제와 같은 비구조물적 또는 관리상의 대안이나 제도적 대안도 고려될 수 있다(심명필, 2001a; 2001b).

최근의 치수계획은 이 같은 대안수립 개념과 부합하는 유역단위의 계획으로 전환되고 있으나 하천개수사업에 중점을 두었던 과거에는 이러한 대안수립의 일반적 원리가 이론적으로나 현실적으로 적용되기 어려운 면이 있었다. 일례로 하천개수를 위한 제방축조나 통수단면 확장 등과 같은 사업들은 구간에 따라 개별적으로 계획되었고, 개개의 사업들을 대안으로 생각하여 경제성을 비교하였다. 그러나 대상사업들 중에서 어느 한 곳이라도 경제성이 낮게 평가되어 시행이 어렵게 되면 계획 전체가 무의미해 지는 결과를 초래하게 되므로 대안들에 대한 적절한 평가가 이루어지지 못한 측면도 일부 존재하였다. 이러한 과거의 예는 개별적 사업들이 대안을 구성하는 하나의 요소일 뿐, 결국 상호 비교 가능한 대안은 아니라는 것을 반증하고 있다. 대안이란 어느 하나가 선정되면 다른 모든 것들은 배제되어야 하는 상호 배타성을 가진 것이기 때문이다(이충성, 2007).

한편, 유역단위의 치수계획을 수립한다면 가능한 단위사업들의 조합은 매우 복잡한 양상으로 나타날 것이고 의사결정자가 고려해야 할 대안의 수는 그만큼 증가할 것이다. 간단한 예로 하류의 홍수피해 경감을 위해서는 상류에 댐을 건설할 수도 있고 하류에 직접 제방을 건설할 수도 있으며 댐과 제방을 동시에 고려해 볼 수도 있다. 위의 세 가지 경우는 모두 하나의 대안이 될 수 있으며 두 시설물의 사업규모에 따라 많은 수의 조합이 가능하다. 의사결정자는 이 중에서 상대적으로 적은 비용으로 목적을 이룰 수 있는 조합을 대안으로 수립하고자 할 것이다. 많은 국가예산이 투입되는 치수사업이 대안의 수립단계에서부터 최대한 효율적인 사업이 되도록 해야 하기 때문이다. 따라서 대안내 단위사업들의 사업규모를 상대적으로 조정하여 최적상태에 다다르게 하는 최적사업규모 분석은 대안수립을 위한 필수적인 과정이라 할 수 있다.

본 연구는 치수계획의 대안수립시 단위사업들의 조합에 의해 발생하는 수많은 경우의 수를 대안수립의 범주에 포함시키고, 경제적 효율성 측면에서 최적사업규모를 고려하는 방법을 제시하기 위한 것이다. 이를 위해서 경제학의 생산이론에 근거한 사업의 최적규모 결정조건과, 결정된 최적규모에 따른 대안수립 방안을 제시하고 제시된 방법론에 대한 사례연구로서 영산강유역의 치수계획을 위한 대안들을 최적사업규모 결정을 통해 수립하였다.

2. 치수사업의 최적규모 결정 조건

치수사업은 댐이나 제방과 같은 홍수방어시설물들을 투입하여 홍수피해경감을 산출하는 생산활동의 하나로 볼 수 있다. 이 때, 투입과 산출 간에는 일정한 기술적 관계가 존재하게 되는데, 이를 함수형태로 표시한 것이 생산함수(production function)이다. 투입요소들과 산출요소들 간의 독립성을 가정할 때, 치수사업의 생산함수는 다수의 투입과 다수의 산출을 나타내는 벡터형태로 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &Y = f(\underline{X}) \;\rightarrow\; f(\underline{X}, \underline{Y}) = 0 \\ &\underline{X} = x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_m \\ &\underline{Y} = y_1 + y_2 + y_3 + \cdots + y_n \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, 투입벡터 $\underline{X}$는 투자계획 또는 대안을 의미하며 m개의 투입요소들은 치수사업의 대안을 구성하는 단위사업안을 나타낸다고 할 수 있다. 산출벡터 $\underline{Y}$는 투입에 의해 생산된 산출의 총합을 나타내는데, n개의 산출요소들은 각 지역별 피해경감량을 나타낼 것이다.

생산함수를 이용한 최적규모 결정 과정은 일정 수준의 홍수피해 경감을 산출할 수 있는 최소비용투입조합(least-cost input combination)을 산출수준의 변화에 따라 연속적으로 결정해 나가는 것이라 할 수 있다. 만일 두 개의 홍수방어시설물 x_1, x_2의 투입으로 일정 수준의 홍수피해경감이 이루어진다면, 최소비용투입조합은 투입요소들에 대한 등비용선(iso-cost line)과 등량선(isoquant line)의 접점에서 이루어지며 이를 수식으로 나타내면 Eq. (2)와 같이 x_1, x_2의 변화에 따른 총비용의 변화량인 한계단위비용(marginal unit price) MC^P의 비가 한계기술대체율(MRTS, Marginal Rate of Technical Substitution)과 같아지는 조건이 된다.

$$\frac{MC_1^P}{MC_2^P} = MRTS_{12} \tag{2}$$

산출수준을 증가시키면서 최소비용투입조합을 결정해 나간다면, 각 산출수준별로 투입조합의 총비용(TC, Total Cost)과 피해경감에 대한 총편익(TB, Total Benefit)이 산정될 수 있다. 이러한 결과로부터 치수사업의 최적규모는 Eq. (3)과 같이 총비용과 총편익의 차가 가장 크거나, 또는 이들에 대한 한계비용(MC, Marginal Cost)과 한계편익(MB, Marginal Benefit)이 같아지는 산출수준(또는 생산규모)에서 결정되게 된다.

$$Max\,(TB-TC)\ \text{ or }\ MB/MC=1 \qquad (3)$$

3. 대상유역과 치수계획 현황

본 연구는 유역치수계획 대안수립 방안의 적용을 위해 영산강유역을 대상으로 하였다. 현재 영산강유역은 국가하천 5개소 및 지방1급 하천 2개소 등 총연장 237 km, 유역면적 3,455 km^{2}를 대상으로 유역종합치수계획이 수립되어 있다. 따라서 대안수립 방법의 적용을 위한 수문 및 인문·사회 자료와 단위사업안들은 영산강유역종합치수계획(건설교통부, 2007)을 참고하였다. 그러나 본 연구는 유역종합치수계획과는 다른 목적으로 연구되었으며, 분석과정에서 산정된 홍수량, 단위사업안들의 홍수조절효과, 홍수피해액 등에도 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구의 결과 수립된 대안들은 유역종합치수계획과 다른 것임을 미리 밝혀둔다.

3.1 영산강유역의 개황

영산강유역은 전라남북도와 광주광역시에 걸쳐있는 우리나라 5대강 유역의 하나로서 유역내 거주인구는 약 225만명이다. 유역의 형상은 유역면적 3,455 km^2, 유로연장 129.5 km, 유역 평균폭 26.7 km으로서 직사각형 형태의 수지상 하천이다. 유역의 평균경사는 19.5%로 비교적 완만하며 유역 중·상류에는 광주광역시와 나주시 등의 도심지가 분포하지만 유역 전반적으로 하천에 인접하여 농경지가 발달해 있다. 전체 유역면적 중 임야와 농경지가 각각 51%와 34%를 차지하고 있으며, 도시지역은 7%밖에 되지 않아 도시화가 크게 진행되지 않은 유역으로 볼 수 있다.

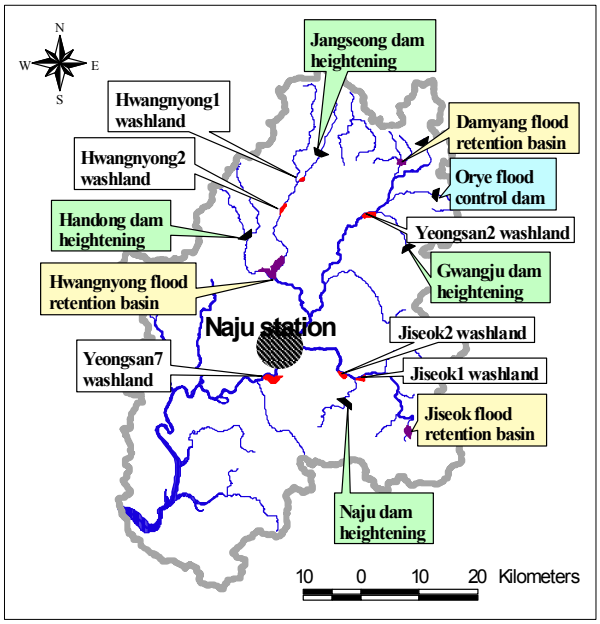

Fig. 1. Individual Proposals in Study Area

3.2 대상 치수계획의 단위사업안

영산강유역종합치수계획은 Fig. 1에 나타나 있는 나주수위표를 기점으로 중·상류부와 하류부로 분류되어 있다. Fig. 1 and Table 1은 분류된 단위사업안들을 나타낸 것으

Table 1. Project Details of 'Basin-Wide Integrated Flood Control Plans for the Yeongsan River Basin'

Flood Mitigation Plan		Objective	Project Detail
Upstream and Midstream	Rehabilitation of agricultural dam	Enhancing flood control capability of existing dams	• Dam heightening of 4 agricultural dams (Jangseong, Naju, Gwangju, Hamdong)
	Flood control dam	Flood control by new dam	• Construction of Orye flood control dam
	Flood retention basin	Flood control by new flood retention basins	• Construction of 3 flood retention basins (Jiseok, Hwangnyong, Damyang)
	Washland	Flood retention using farmlands in riverine lowlands	• Construction of 6 washlands (Yeongsan2, Yeongsan7, Hwangnyong1, Hwangnyong2, Jiseok1, Jiseok2)
Downstream	Rehabilitation of estuary barrage	Lowering flood level of Yeongsan river estuary	• Lock gate expanding of Yeongsan river estuary barrage
	Rehabilitation of Yeongam lake	Lowering flood level of Yeongsan river estuary using storage capacity of Yeongam lake	• Lock gate expanding of Yeongam lake • Diversion water way widening between Yeongsan and Yeongam lake • Check gate construction/replacement

로 중·상류부에는 농업용댐 증고 4개 사업, 신규댐 1개사업, 천변저류지 6개 사업, 홍수조절지 3개 사업 등 14개 사업이, 하류부에는 영산강 하구둑 배수갑문 확장사업, 영암호 저류공간 활용사업, 기타 하천개수사업 등이 단위사업으로서 고려되었다. 중·상류부 치수계획은 나주수위표를 피해우심지(damage center)로 하여 각 단위사업들을 조합하는 유역저류식 홍수량 분담계획이다. 반면, 하류부 치수계획은 영산호 내수위 상승으로 인해 저하된 하도통수능 개선을 위한 홍수위 저감과 지체시간 단축이 목적이다.

이처럼 하류의 치수계획을 별도로 수립한 이유는 하류부의 통수능 저하를 모두 상류의 저류시설물로 해결하는 것이 과다설계로 이어질 수 있기 때문이다. 따라서 하류부의 단위사업들은 대안수립 과정에서 모든 대안에 공통적으로 포함되므로 본 연구는 중·상류부 치수계획만을 대상으로 대안수립 방법을 적용하였다.

4. 투입-산출 관계의 설정

4.1 단위사업안들의 유형 설정

단위사업안의 유형은 투자로 인해 나타나는 효과가 기능적으로 서로 다르고, 한쪽의 시행 여부가 다른 쪽의 시행여부에 영향을 주지 않는 독립안(independent proposal)과 상호간에 영향을 주는 종속안(dependent proposal)으로 구분할 수 있다. 또한 종속안은 다른 단위사업의 채택을 배제하는 결과를 가져오는 배반안(exclusive proposal)과 특정 단위사업안의 채택에 부수적으로 연계되어 있는 부가안(contingent proposal)으로 구분할 수 있다. 단위사업안들의 유형과 상호관계를 고려하여 조합하면 상호배타적인 대안들을 나열할 수 있게 된다(Thuesen and Fabrycky, 1993).

Table 2는 Table 1에서 제시된 중·상류 치수계획의 단위사업안들을 유형별로 분류한 것이다. 천변저류지 6개, 홍수조절지 3개, 신규댐 1개 사업은 각각 전체 단위사업들에 대해 독립안으로 설정하였다. 반면, 4개의 농업용댐 증고사업들의 경우에는 증고 높이에 따라 각각 8개(0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m)씩 32개의 단위사업안으로 설정하여 각 댐의 증고 높이별로 상호 배반안이 되도록 하였다. 최종적으로 본 연구의 대상 단위사업안은 총 42개로 설정되었다.

4.2 단위사업안들의 조합

일반적으로 $\forall p_{\cdot j} \in P_{i\cdot}$의 관계를 갖는 m개의 단위사업안 $p_{\cdot j}$는 각각 채택과 기각을 의미하는 1과 0으로 이루어진 n개의 단위사업안 조합에 의해 이진행렬(binary matrix) P_{ij}를 작성하게 된다. 따라서 열벡터 $P_{i\cdot}$는 n개의

Table 2. Individual Proposals by Type

Individual Proposal		Type
$p_1 \sim p_8$	Jangseong dam heightening, 0.5 m~4 m	Mutually exclusive
$p_9 \sim p_{16}$	Naju dam heightening, 0.5 m~4 m	Mutually exclusive
$p_{17} \sim p_{24}$	Gwangju dam heightening, 0.5 m~4 m	Mutually exclusive
$p_{25} \sim p_{32}$	Hamdong dam heightening, 0.5 m~4 m	Mutually exclusive
p_{33}	Yeongsan2 washland	Independent
p_{34}	Yeongsan7 washland	Independent
p_{35}	Hwangnyong1 washland	Independent
p_{36}	Hwangnyong2 washland	Independent
p_{37}	Jiseok1 washland	Independent
p_{38}	Jiseok2 washland	Independent
p_{39}	Orye flood control dam	Independent
p_{40}	Jiseok flood retention basin	Independent
p_{41}	Hwangnyong flood retention basin	Independent
p_{42}	Damyang flood retention basin	Independent

대안을 갖는 대안행렬 A_i로 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다(이충성 등, 2005).

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix},\ P_{i\cdot} = \begin{bmatrix} p_{1\cdot} \\ p_{2\cdot} \\ \vdots \\ p_{n\cdot} \end{bmatrix} = A_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $(i = 1, 2, 3, \cdots, n)$, $(j = 1, 2, 3, \cdots, m)$, $n = 2^m$, $[a_i] = [p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{im}]$이다.

예를 들어, 4개의 단위사업안들로 이루어진 치수계획이 있다고 가정하자. 단위사업안들의 유형은 p_1(방수로)과 p_2(댐)는 배반안, p_3(배수문)는 p_1의 부가안이며, p_4(천변저류지)는 독립안이다. 또한, 단위사업안들의 예산은 각각 p_1 90억, p_2 60억, p_3 20억, p_4 30억원이며 전체 사업의 예산 한도는 120억원이다. 산술적으로 4개의 단위사업안에서 조합 가능한 대안은 Table 3과 같이 $n = 2^4$; 즉, 16가지가 된다. 그러나 단위사업안들의 유형에 따른 상호관계를 고려하면 조합이 가능한 대안은 Table 3의 실행가능성에서 ○와 △표식으로 되어있는 8가지로 감소한다. 그러나 기술적인 조합 가능성 이외에도 120억원의 예산제약을 고려하면 A_{14}는 실행이 불가능하며, 미시행(Do-Nothing)인 A_1과 천변저류지만 시행하는 A_9의 경우도 사업목표 달성이 어려운 상황이라고 한다면 실행 가능한 대안은 ○표식으로 되어있는 5가지로 압축될 것이다.

만일, 단위사업안이 많을 경우에 Table 3과 같이 대안 각각에 대해 실행가능성을 판별하는 방식은 매우 비효율적이다. Table 2에 나타낸 42개의 단위사업안들을 단순조합하면 $n = 2^{42}$; 즉, 4.398×10^{12} 이상의 천문학적 숫자

Table 3. Binary Matrix for 4-Proposal Example

	Individual proposal				Cost	Feasibility (Reason of Infeasibility)	
	p_1	p_2	p_3	p_4			
A_1	0	0	0	0	0	△	can't achieve the goal
A_2	1	0	0	0	90	○	
A_3	0	1	0	0	60	○	
A_4	1	1	0	0	150	×	p_1, p_2 are exclusive
A_5	0	0	1	0	20	×	p_3 is contingent to p_1
A_6	1	0	1	0	110	○	
A_7	0	1	1	0	80	×	p_3 is contingent to p_1
A_8	1	1	1	0	170	×	p_1, p_2 are exclusive
A_9	0	0	0	1	30	△	can't achieve the goal
A_{10}	1	0	0	1	120	○	
A_{11}	0	1	0	1	90	○	
A_{12}	1	1	0	1	180	×	p_1, p_2 are exclusive
A_{13}	0	0	1	1	50	×	p_3 is contingent to p_1
A_{14}	1	0	1	1	140	△	budget restriction
A_{15}	0	1	1	1	110	×	p_3 is contingent to p_1
A_{16}	1	1	1	1	200	×	p_1, p_2 are exclusive

가 되기 때문이다. 따라서 단위사업안의 개수가 많을 경우에는 단위사업안들의 유형에 따라 상호 독립적이고 배반안들을 원소로 갖는 배반안 집합을 작성하여 대안행렬을 구성할 수 있다. 예제에서 4개의 단위사업안들을 배반안 집합으로 나타내면 $\{\varnothing, p_1, p_2, p_1|p_3\}$, $\{\varnothing, p_4\}$와 같이 2개의 집합을 작성할 수 있다. 각 집합에서 $\varnothing$는 미시행을 의미하고, $p_3|p_1$는 부가안으로서 p_1이 실행될 때에만 p_3가 실행될 수 있음을 나타낸다. 배반안 집합의 원소들은 상호 배반이므로 같은 대안에 포함될 수 없으며 다른 집합의 원소들과 조합을 이룬다. 따라서 실제로 조합 가능한 대안들의 개수는 Eq. (5)에 따라 N_1=4, N_2=2이므로 총 8개임을 알 수 있다.

$$n_e = \prod_{k=1}^{s} N_k = N_1 \times N_2 \times N_3 \times \cdots \times N_s \qquad (5)$$

여기서, n_e는 배타적 대안들의 개수이고, s는 배반안집합의 개수, N_k는 k번째$(k=1,2,3,\cdots,s)$ 집합에 포함된 배반안의 개수이다.

Table 4는 영산강유역 치수계획의 단위사업안들에 대해 배반안 집합을 작성한 것이다. Eq. (5)에 의하면 조합이 가능한 대안의 수는 $n_e = 9^4 \times 2^{10} = 6{,}718{,}464$ 으로 단순조합에 비해 현격히 감소했지만, 여전히 의사결정시 큰 부담이 되는 개수이다. 따라서 최적사업규모 를 결정하여 평가할 대안의 개수를 줄여야 한다.

Table 4. Set of Exclusive Proposals for Study

k	Set of Exclusive Proposals, x_k	N_k
1	$\{\varnothing, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$	N_1 = 9
2	$\{\varnothing, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}\}$	N_2 = 9
3	$\{\varnothing, p_{17}, p_{18}, p_{19}, p_{20}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}\}$	N_3 = 9
4	$\{\varnothing, p_{25}, p_{26}, p_{27}, p_{28}, p_{29}, p_{30}, p_{31}, p_{32}\}$	N_4 = 9
5	$\{\varnothing, p_{33}\}$	N_5 = 2
6	$\{\varnothing, p_{34}\}$	N_6 = 2
7	$\{\varnothing, p_{35}\}$	N_7 = 2
8	$\{\varnothing, p_{36}\}$	N_8 = 2
9	$\{\varnothing, p_{37}\}$	N_9 = 2
10	$\{\varnothing, p_{38}\}$	N_{10} = 2
11	$\{\varnothing, p_{39}\}$	N_{11} = 2
12	$\{\varnothing, p_{40}\}$	N_{12} = 2
13	$\{\varnothing, p_{41}\}$	N_{13} = 2
14	$\{\varnothing, p_{42}\}$	N_{14} = 2

4.3 투입벡터와 산출벡터 결정

사업최적규모를 결정하기 위해서는 가변투입요소들의 투입량 변화에 따라 산출요소들의 산출량 변화를 최적화해야 한다(James and Lee, 1971). 따라서 투입벡터 $\underline{X}$는 Table 4의 배반안 집합 x_k를 투입요소로 하여 구성할 수 있다. 즉, 배반안 집합의 원소인 단위사업안들은 투입요소 x_k의 규모변화를 나타내는 변량이 된다. 산출벡터 $\underline{Y}$의 산출요소 y_j에 의해 산출되는 생산물은 홍수량경감이고 이를 나타낼 수 있는 것은 홍수량산정지점이지만 경감된 홍수량의 가치는 주변지역의 피해경감액으로 산정된다. 따라서 홍수량산정지점과 주변지역 간에 존재하는 유량-피해관계를 나타낼 수 있도록 산출벡터를 구성해야 한다. 만일 치수단위구역이 설정되어 있는 경우라면 홍수피해액은 치수단위구역별로 산정될 것이므로 몇 개의 치수단위구역의 지표가 될 수 있는 홍수량산정지점들을 산출벡터로 구성하면 될 것이다. 즉, 주요 지류의 합류부나 단위사업안들의 전후에 위치한 지점 중에서 주변지역의 홍수피해경감효과를 나타낼 수 있는 지점을 선정하면 된다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 피해우심지인 나주수위표(y_{13})를 포함하여 총 17개 지점을 산출요소로 선정하였다. 투입 및 산출벡터는 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{X} = \sum_{k=1}^{s} x_k \ , \ \underline{Y} = \sum_{j=1}^{n} y_j \qquad (6)$$

여기서, x_k는 k번째 배반안 집합, y_j는 선정된 홍수량산정지점에서 j번째 지점을 나타낸다.

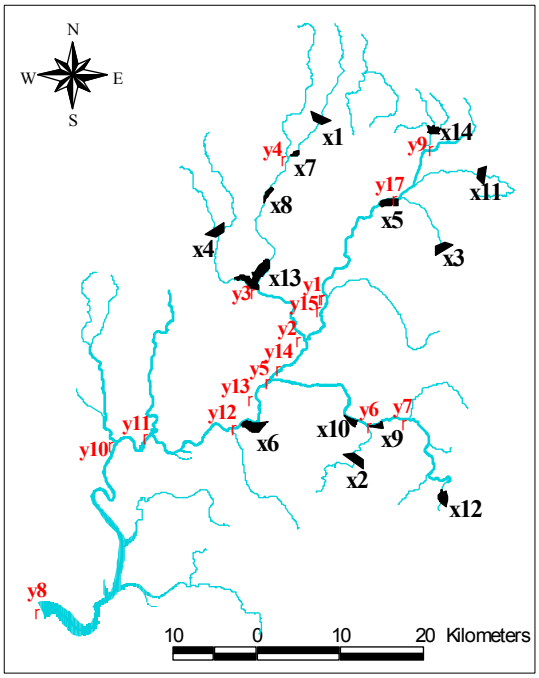

Fig. 2. Elements of Input and Output Vector

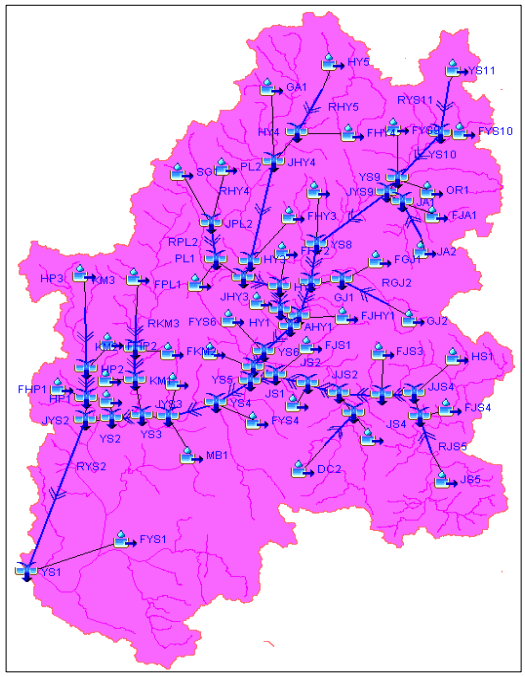

Fig. 3. Basin Model of HEC-HMS

5. 최적사업규모 결정에 의한 대안수립

투입벡터와 산출벡터가 결정되었으면 최적사업규모를 결정하여 대안을 수립할 수 있다. 이를 위해서 수행하여야 할 분석은 크게 세 가지로서 단위사업안들의 규모에 따른 홍수량산정지점별 홍수경감량 산정, 단위사업안들의 비용 산정, 각 홍수량산정지점별 홍수피해경감편익 산정 등이다. 이 같은 분석결과를 이용하여 산출수준별 최소비용투입조합 중에 순편익을 최대화하는 최적사업규모를 결정할 수 있다.

5.1 홍수량산정지점별 홍수경감량 산정

본 연구에서는 홍수량산정지점(산출요소)별 홍수경감량(산출량) 산정 및 홍수조절효과 모의를 위하여 미공병단의 HEC-HMS모형을 이용하였다. 모의에 사용된 강우자료와 하도 및 유역특성자료, 매개변수 등은 영산강유역종합치수계획을 참고로 하였으며, 홍수조절효과 분석시 현재 운영 중인 5개 농업용댐(담양, 장성, 나주, 광주, 함동)의 홍수조절능력을 반영하였다. Fig. 3은 HEC-HMS의 Basin Model을 나타내고 있다.

4개 농업용댐 증고안($p_1 \sim p_{32}$)과 오례댐 건설안(p_{39})은 미공병단의 HEC-5모형을 이용하여 Auto ROM에 의한 저수지운영으로 조절효과를 분석하였다. Auto ROM은 댐 수위를 항상 만수위 또는 제한수위로 유지하도록 하는 운영방식으로서 댐 수문조작이 용이하여 홍수조절용량이 소규모인 농업용저수지에서 주로 사용하고 있다. 한편, 영산강유역종합치수계획에서는 Auto ROM과 함께 일정률-일정량방식(Rigid ROM)에 의해 조절효과를 분석한 바 있다. 그러나 각 댐의 유역면적이 작고 도달시간이 짧아 댐 운영을 위해 필요한 선행시간(lead time)이 충분하지 못하고 댐 수문조작이 복잡하여 농업용저수지의 경우 운영미숙으로 인한 위험성이 가중될 소지가 있다는 점을 문제로 들어 Auto ROM에 의한 분석결과를 채택한 바 있다.

또한, 지석(p_{40}), 황룡(p_{41}), 담양(p_{42}) 등 3개 홍수조절지 건설안은 홍수조절용량을 최대로 활용하면서 유입수문곡선의 첨두부를 저감시키도록 목표방류량을 결정하고 이에 따른 조절효과를 분석하였다. 6개 천변저류지안($p_{33} \sim p_{38}$)의 조절효과는 횡월류량을 부정류 해석한 결과(건설교통부, 2007)를 HEC-HMS의 Diversion Element에 적용하여 모의하였다.

5.2 단위사업안들의 비용산정

일정한 홍수경감량을 달성하는데 따른 최소비용투입조합을 결정하기 위해서는 투입요소 x_k의 규모변화를 나타내는 각 단위사업의 사업비를 추정하여야 한다. 그러나 치수사업의 계획단계에서 실시설계 수준의 구체적이고 실질적인 사업비를 산정하기는 쉽지 않기 때문에 개략사업비를 추정하는 것으로 충분할 것이다. 본 연구에서는 영산강유역종합치수계획에서 산정한 개략사업비를 활용하였으며, 그 내용을 Table 5와 같이 투입벡터의 각 요소별로 나타내었다.

Table 5. Estimated Cost of Individual Proposals as the Variable Input Cost of Each Input Element

Input Element	Individual Proposal		Cost (million ₩)	Input Element	Individual Proposal		Cost (million ₩)
x_1	p_1	Jangseong dam 0.5 m	28,471	x_3	p_{22}	Gwangju dam 3.0 m	45,481
	p_2	Jangseong dam 1.0 m	32,293		p_{23}	Gwangju dam 3.5 m	50,615
	p_3	Jangseong dam 1.5 m	36,158		p_{24}	Gwangju dam 4.0 m	58,307
	p_4	Jangseong dam 2.0 m	40,066	x_4	p_{25}	Hamdong dam 0.5 m	21,347
	p_5	Jangseong dam 2.5 m	43,991		p_{26}	Hamdong dam 1.0 m	23,140
	p_6	Jangseong dam 3.0 m	57,497		p_{27}	Hamdong dam 1.5 m	26,134
	p_7	Jangseong dam 3.5 m	63,708		p_{28}	Hamdong dam 2.0 m	28,548
	p_8	Jangseong dam 4.0 m	71,502		p_{29}	Hamdong dam 2.5 m	31,764
x_2	p_9	Naju dam 0.5 m	31,588		p_{30}	Hamdong dam 3.0 m	33,582
	p_{10}	Naju dam 1.0 m	34,954		p_{31}	Hamdong dam 3.5 m	50,464
	p_{11}	Naju dam 1.5 m	39,939		p_{32}	Hamdong dam 4.0 m	61,211
	p_{12}	Naju dam 2.0 m	43,698	x_5	p_{33}	Yeongsan2 washland	36,060
	p_{13}	Naju dam 2.5 m	47,604	x_6	p_{34}	Yeongsan7 washland	75,420
	p_{14}	Naju dam 3.0 m	50,847	x_7	p_{35}	Hwangnyong1 washland	23,890
	p_{15}	Naju dam 3.5 m	61,460	x_8	p_{36}	Hwangnyong2 washland	22,510
	p_{16}	Naju dam 4.0 m	75,148	x_9	p_{37}	Jiseok1 washland	27,810
x_3	p_{17}	Gwangju dam 0.5 m	32,272	x_{10}	p_{38}	Jiseok2 washland	28,750
	p_{18}	Gwangju dam 1.0 m	34,987	x_{11}	p_{39}	Orye flood control dam	177,459
	p_{19}	Gwangju dam 1.5 m	37,837	x_{12}	p_{40}	Jiseok flood retention basin	121,680
	p_{20}	Gwangju dam 2.0 m	40,611	x_{13}	p_{41}	Hwangnyong flood retention basin	436,240
	p_{21}	Gwangju dam 2.5 m	43,164	x_{14}	p_{42}	Damyang flood retention basin	933,70

5.3 유량-피해 관계의 유도

최적사업규모 결정을 위해서는 다양한 규모의 홍수경감량에 따른 편익을 산정하여 이에 대응하는 최소비용투입조합의 비용과 비교하여 순편익을 최대화 할 수 있는 홍수경감 규모를 결정해야 한다. 본 연구에서는 앞서 선정된 17개의 산출지점(홍수량산정지점)에서의 편익산정을 위해 건설교통부(2004)에서 개발한 '다차원홍수피해산정법'을 이용하였다. 다차원홍수피해산정법은 침수면적과 피해액을 이용한 회귀식에 의해 홍수피해를 산정하는 기존의 '개선법'을 대신한 것으로서 현행 하천설계기준에 의해 치수경제성분석을 위한 방법론으로 추천되고 있으며, 최근 국토해양부(2008)의 연구에 의해 개정판이 제시되어 있다. Fig. 4는 17개의 산출지점별 유량-피해 관계곡선 중에서 나주수위표(y_{13})의 유량-피해 관계곡선을 나타내고 있다.

5.4 대안수립

최적사업규모 결정을 위해서, 먼저 피해우심지인 나주수위표(y_{13})에서 임의로 선택한 홍수경감량을 만족시키는 투입조합들 중 최소비용의 투입조합을 결정하고, 각 산출지점별로 산정된 편익을 총합하여 순편익을 산정하

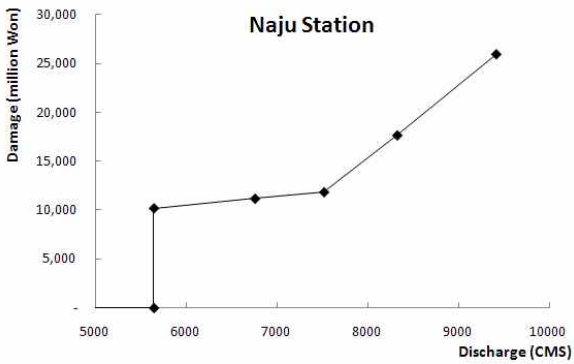

Fig. 4. Discharge-Damage Curve of Naju Station

였다. 다음으로 나주수위표의 홍수경감량을 증가시키면서 이 같은 작업을 반복 수행하였으며, 최종적으로 Fig. 5와 같이 투입 및 산출조합의 총비용 및 총편익을 평면상에 나타내었다. 즉, Fig. 5는 임의의 홍수경감량에 따른 총편익에서 최소비용의 생산규모를 결정한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 최적사업규모는 한계편익과 한계비용의 비가 1인 직선에 접하는 점(MB/MC=1)으로서 총편익 285,293백만원, 총비용 203,781백만원으로 순편익이 81,512백만원인 것으로 나타났다. 그러나 경제적으로 최적인 대안이

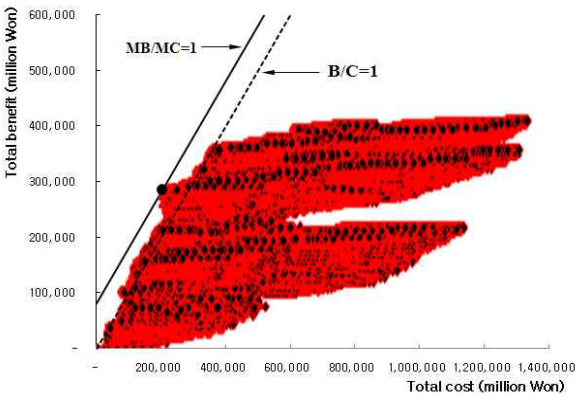

Fig. 5. Determination of Optimal Project Size

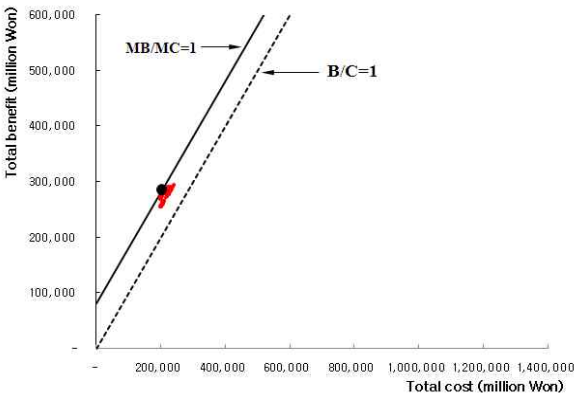

Fig. 6. Selection of Alternatives

Table 6. Final Result of Alternative Development by Determining Optimal Project Size

A_i	Individual Proposals														Total Cost (million ₩)	Total Benefit (million ₩)	B/C	Net Benefit (million ₩)	**Flood Reduction (m^3/s)
	p_1	p_2	p_3	p_{10}	p_{20}	p_{21}	p_{22}	p_{28}	p_{29}	p_{33}	p_{35}	p_{37}	p_{38}	p_{42}					
*A_1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	203,781	285,293	1.400	**81,512**	921.93
A_2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	206,098	287,574	1.395	**81,476**	936.51
A_3	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	199,959	281,019	**1.405**	81,060	804.90
A_4	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	197,406	277,265	**1.405**	79,859	786.17
A_5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	242,158	**294,983**	1.218	52,825	986.76
A_6	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	237,862	**291,951**	1.227	54,089	1050.72
A_7	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	234,646	289,327	1.233	54,681	**1010.41**
A_8	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	234,848	288,063	1.227	53,215	**961.17**
A_9	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	**233,853**	288,868	1.235	55,015	945.12
A_{10}	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	**233,908**	287,908	1.231	54,000	950.44

* Optimal project size, ** Flood reduction of 100 yr frequency flood at the damage center (Naju station)

Table 7. Alternatives Proposed by 'Basin-Wide Integrated Flood Control Plans'

A_i	Dam Heightening							Washland						New Dam*	Flood Retention Basin			Lowering RWL**
	p_3	p_4	p_{11}	p_{12}	p_{18}	p_{27}	p_{28}	p_{33}	p_{34}	p_{35}	p_{36}	p_{37}	p_{38}	p_{39}	p_{40}	p_{41}	p_{42}	
A_1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	
A_2	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	
A_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
A_4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	

* Construction of Orye flood control dam, ** Lowering restricted water level of Jansung and Naju dam by 1.0 m

최선안임을 보장할 수는 없다. 따라서 최적규모로 결정된 대안뿐만 아니라 경제성 이외의 기준들도 포함한 다기준의 대안간 평가가 필요할 것이다. 즉, 경제적으로 충분한 수준의 효율성이 입증된 대안들은 의사결정선상에 계속 남겨두어야 한다.

이에 따라, 본 연구는 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 최적사업규모를 포함한 순편익 기준 상위 200순위에 있는 조합들을 모집단으로 정한 후, 순편익이 큰 상위 2개(A_1, A_2), B/C가 큰 상위 2개(A_3, A_4), 총편익이 큰 상위 2개(A_5, A_6), 홍수경감량이 큰 상위 2개(A_7, A_8), 소규모 단위사업(천변저류지와 홍수조절지)이 포함된 조합 중 총비용이 작은 상위 2개(A_9, A_{10})의 순서로 비복원 추출하여 총 10개의 조합을 대안으로 수립하였다. 여기서, 순편익 상위 200순위의 조합들을 대안수립을 위한 모집단으로 설정한 이유는 순위를 너무 높게 설정할 경우 댐과 같이 사업규모가 크고 비용대비 홍수조절효과가 큰 단위사업 안들만으로 구성된 조합들이 대안을 독점 할 수 있기 때문이다. 일반적으로 순편익은 사업규모의 영향을 크게 받기 때문에 천변저류지 및 홍수조절지와 같이 상대적으로 사업규모가 작고 비용-효과적으로 불리한 단위사업들은

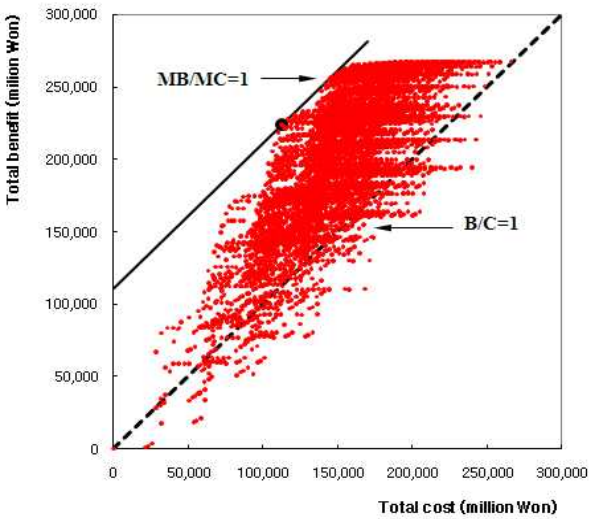

Fig. 7. Economic Evaluation Only with Dam Heightening Proposals

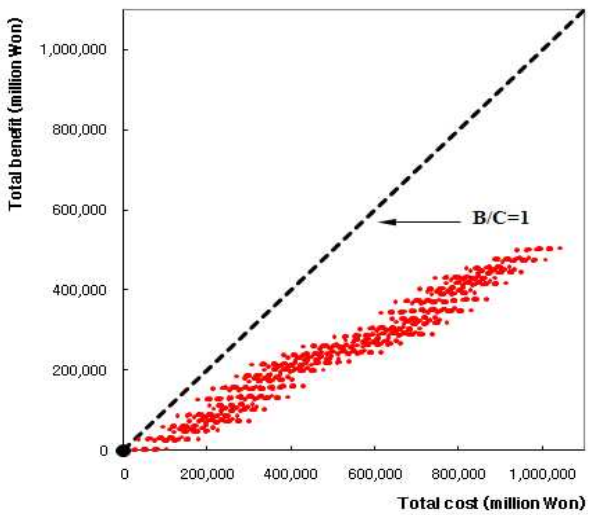

Fig. 8. Economic Evaluation Only with Washland and Flood Retention Basin Proposals

정책적인 선호도와 관계없이 순편익 기준에서는 불리할 수밖에 없다. 모집단 전체를 대안으로 수립하여 다기준 평가를 수행할 수도 있으나, 필요이상으로 대안이 많을 경우 의사결정자의 판단력에 혼란을 일으켜 의사결정에 오류를 범할 수도 있다. 이러한 기준에 따라 최종적으로 수립된 10개의 대안은 Table 6과 같다.

실제로, 유역종합치수계획에서는 Table 7의 3, 4안과 같이 극단적으로 천변저류지와 홍수조절지만으로 구성된 대안도 수립한 반면, 본 연구에서 수립한 Table 6의 대안들은 모두 댐 증고안이 포함되어 있다. 이 같은 결과는 천변저류지나 홍수조절지의 비용대비 홍수량경감 효과가 댐 증고안보다 상대적으로 낮기 때문이다. 유역종합치수계획에서도 4안은 보상비로 인해 총비용이 가장 높은 것으로 제시하고 있다.

Figs. 7 and 8은 이를 잘 나타내고 있다. 댐 증고안 만을 대상으로 최적사업규모를 결정한 결과인 Fig. 7이 전반적으로 경제성이 큰 것으로 나타난 반면, 천변저류지 및 홍수조절지안 만을 대상으로 한 Fig. 8의 결과에서는 B/C>1인 조합이 없는 것으로 나타났다. 따라서 경제성 측면만을 고려할 때, 천변저류지나 홍수조절지는 낮은 비용대비 효과로 인해 대안수립 시 유역단위의 전역적 대책으로 포함되기는 어려울 것으로 판단된다.

6. 분석 및 고찰

본 연구는 최적사업규모 결정을 통해 Table 6과 같이 10개의 대안을 수립하였다. 반면, 영산강유역종합치수계획에서는 대안수립에 대한 기준 제시 없이 Table 7과 같이 4개의 대안을 수립하였다. 따라서 기술적 검토를 바탕으로 의사결정자의 주관적 판단이 많이 개입되었을 것으로 보인다. 이러한 대안수립 방법은 경제적 효율성을 최대화 한다는 측면에서는 불리할 수 있으나, 유역 전반의 경제 외적인 특수상황들까지 감안하여 특성화된 대안들을 수립할 수 있는 장점도 있다.

이러한 특징은 Table 7에서 잘 나타나고 있다. 1안은 댐 증고안을 위주로 설정하였고, 2안은 댐 증고 높이를 1안보다 낮추면서 신규댐(p_{39}) 건설로 이를 보완하였으며, 3안은 댐 증고 없이 비교적 홍수조절용량이 큰 장성댐과 나주댐의 제한수위를 낮추는 방안에 중점을 두었고, 4안은 댐에 의한 홍수조절을 지양하고 천변저류지와 홍수조절지를 중심으로 수립하여 차별화된 전략으로 대안들을 수립하였다.

7. 결 론

본 연구는 단위사업안들의 조합을 통한 경제적 최적사업규모를 결정함으로써 유역치수계획의 대안수립 방안을 제시한 것이다. 이를 위하여 단위사업안들의 유형을 독립안, 배반안, 부가안으로 구분하고 상호관계를 고려하여 조합하는 체계적 방법도 제시하였다. 본 연구는 이러한 최적사업규모 결정을 통한 대안수립 방안을 영산강유역종합치수계획에 대해 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

최적사업규모 결정시 단위사업안간 사업규모 차이가 크면 대규모 단위사업안들이 투입조합의 순편익에 지배적 영향을 미치는 경향이 나타났다. 영산강유역에 적용한 결과로는 수립된 10개의 대안들에서 댐 증고안이 대안의 효율성에 지배적 영향을 미치는 양상을 보였다. 이는 댐 증고안이 다른 단위사업안들에 비해 비용-효과 측면에서 유리하기 때문에, 댐 증고안이 포함된 조합은 순편익도

커서 선택될 확률이 높았기 때문이다. 이렇게 되면 천변저류지와 같이 상대적으로 소규모의 단위사업안들이 포함된 투입조합은 최적사업규모는 물론이고 대안수립 과정에서 탈락할 가능성이 크다. 그러나 대규모 사업은 유역 전체적으로 큰 홍수피해경감효과를 나타내지만 유역 내 지류하천을 중심으로 나타나는 지엽적 피해를 모두 방어할 수는 없다. 따라서 지역별로 선택적 홍수방어를 위해서는 천변저류지와 같은 소규모 단위사업들도 필요하다.

이러한 사항은 투입벡터 구성을 위한 배반안 집합 작성 시 단위사업안간 유형을 적절히 설정함으로써 반영할 수 있을 것이다. 즉, 홍수조절지 및 댐 증고안과 같은 대규모 단위사업안은 전역적 방어대책이므로 독립안이나 배반안으로, 천변저류지안과 같은 소규모 단위사업안은 지엽적 방어대책으로 고려하여 전역적 방어대책의 부가안으로 설정하면 될 것이다. 이렇게 함으로써 낮은 경제성으로 배제될 수 있는 지엽적 방어대책들을 포함시켜 대안의 다양성을 증가시킬 수 있으며, 부수적으로 최적사업규모 분석에 필요한 조합의 수를 감소시키는 효과도 얻을 수 있다. 다만, 전역 및 지엽적 단위사업안을 구분하고 부가적 관계를 설정하기 위해서는 공학적 분석 단계에서 지류단위로 피해우심지를 달리 설정하여 수문분석을 실시하고, 이를 바탕으로 도출된 홍수조절효과가 피해액 산정에 활용될 수 있도록 해야 할 것이다.

본 연구는 유역단위의 치수계획이 체계적인 의사결정 과정에 따라 추진되어야 하며, 설득력 있는 대안수립이 이러한 과정의 필요조건이라는 것을 전제로 하였다. 상기 전제조건을 위해서는 대안수립이 최적사업규모 분석을 통한 단위사업안들의 조합으로 이루어져야 하며, 이러한 대안수립 개념이 유역단위의 치수계획에 잘 부합한다는 점을 강조한 것이다. 한편 본 연구의 대안수립 방안을 더욱 일반화하기 위해서는 단위사업안을 입안할 때 구조물적 방어대책 뿐만 아니라 비구조물적 방어대책도 포함할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 비구조물적 방어대책에 대한 경제성 평가 방법도 향후 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설교통부 (2004). **치수사업 경제성분석 방법 연구.**

건설교통부 (2007). **영산강유역종합치수계획**.

국토해양부 (2008). **수자원사업의 타당성분석 개선방안 연구**. 11-B500001-000094-01.

심명필 (2001a). “수자원 경제성분석 입문(9).” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권, 제5호, pp. 139-149.

심명필 (2001b). “수자원 경제성분석 입문(10).”, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권, 제6호, pp. 75-83.

이충성 (2007). 유역치수계획 최적대안 결정을 위한 의사결정모형의 개발. 박사학위논문, 인하대학교, pp. 122-184.

이충성, 최승안, 심명필, 김형수 (2005). “치수사업을 위한 다기준의사결정모형 개발: 2. 최선대안 선정 및 투자우선순위 결정”, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제5B호, pp. 347-354.

James, L.D., and Lee, R.R. (1971). *Economics of water resuources planning*. McGraw-Hill Inc., New York.

Thuesen, G.J., and Fabrycky, W.J. (1993). *Engineering Economy*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, U.S.A.

논문번호: 09-130	접수: 2009.11.24
수정일자: 2010.03.18/04.14	심사완료: 2010.04.14