



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

최적화 기법과 비용-편익 분석을  
이용한 빗물이용시설의 규모 결정에  
관한 연구



2022년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

서효원

공 학 석 사 학 위 논 문

최적화 기법과 비용-편익 분석을  
이용한 빗물이용시설의 규모 결정에  
관한 연구



지도교수 이 상 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

서 효 원

서효원의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위 원 장 공학박사 김 수 한 (인)

위 원 공학박사 김 열 우 (인)

위 원 공학박사 이 상 호 (인)

# 목 차

	쪽
표 목차 .....	iv
그림 목차 .....	v
Abstract .....	viii
<b>제1장 서론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 동향 .....	3
1.3 논문의 구성 .....	5
<b>제2장 빗물이용시설의 최적 용량 설계를 위한 방법 ..6</b>	
2.1 입자 군집 최적화 .....	6
2.2 저수지 모의 운영 모형 .....	9
2.3 최적화 알고리즘 .....	11
2.4 최적화 알고리즘을 이용한 최소 용량 결정 과정 .....	12

## 목 차(계속)

제3장 빗물이용시설의 경제성 분석을 위한 방법	14
3.1 경제성 평가	14
3.2 비용편익 비율법	15
3.3 비용과 편익의 산정	19
제4장 CARAH의 사용자 편의 환경 구현	31
4.1 CARAH의 소개 및 구성	31
4.2 최적 용량 설계를 위한 사용자 편의 환경 구현	32
4.2.1 CARAH의 최적 용량 설계 입력 화면	32
4.2.2 CARAH의 최적 용량 설계 출력 화면	37
4.3 경제성 분석을 위한 사용자 편의 환경 구현	40
4.3.1 CARAH의 경제성 분석 입력 화면	40
4.3.2 CARAH의 경제성 분석 출력 화면	42

## 목 차(계속)

제5장 빗물이용시설의 용량 설계 및 분석 결과 .....	44
5.1 대상 지역 선정 .....	44
5.2 빗물저류조 용량 설계 및 경제성 분석 결과 .....	45
5.2.1 최적 용량 설계를 위한 입력 자료 .....	45
5.2.2 최적 용량 설계 결과 .....	49
5.2.3 경제성 분석을 위한 입력 자료 .....	55
5.2.4 경제성 분석 결과 .....	57
제6장 결론 및 향후 연구 .....	65
6.1 요약 및 결론 .....	65
6.2 향후 연구 과제 .....	66
참고문헌 .....	67

## 표 목차

표 2.1 빗물이용시설 모의 운영 모형의 수식 .....	10
표 3.1 건축물 등의 내용연수표 .....	16
표 3.2 경제성 분석을 위한 비용 및 편익 항목 .....	18
표 3.3 빗물이용시설 타입별 초기 설치비 .....	20
표 3.4 조립식 빗물이용시설에 대한 초기 설치비의 상세내역 .....	20
표 3.5 빗물이용시설 타입별 유지관리비 .....	21
표 3.6 상수도 사용량 1,000 m <sup>3</sup> 일 때 수도 요금 시뮬레이션 결과 .....	26
표 3.7 구경별 유량 기준표 .....	26
표 3.8 인천시의 상수도 요율표 .....	27
표 3.9 인천시의 하수도 요율표 .....	28
표 3.10 지자체별 빗물이용시설의 설치비 지원 및 빗물 이용에 따른 요금 감면 .....	29
표 5.1 공급 보장률별 저류 용량 .....	49
표 5.2 분석 기간 30년일 때 저류 용량별 BCR .....	58
표 5.3 저류 용량별 비용의 회수 기간 .....	60

## 그림 목차

그림 2.1 입자 군집 최적화 알고리즘 .....	8
그림 2.2 빗물이용시설의 용량 결정 과정 .....	13
그림 3.1 빗물이용시설의 규모에 따른 설치비 .....	23
그림 3.2 빗물이용시설의 규모에 따른 유지관리비 .....	24
그림 4.1 CARAH의 기본 설정 탭 .....	32
그림 4.2 CARAH의 유입량 산정 탭 .....	33
그림 4.3 CARAH의 목표 공급량 탭 .....	34
그림 4.4 CARAH의 공급 보장률 탭 .....	35
그림 4.5 CARAH의 분석 실행 화면 .....	36
그림 4.6 CARAH의 공급 보장률-저류 용량 탭 .....	37
그림 4.7 CARAH의 목표 공급량-공급량-부족량 탭 .....	38
그림 4.8 CARAH의 유입량-공급량-저류량 탭 .....	39
그림 4.9 CARAH의 경제성 분석 입력 화면 .....	41
그림 4.10 CARAH의 경제성 분석 출력 화면 .....	43

## 그림 목차(계속)

그림 5.1	광고 신도시의 빗물저류조 설치 계획	44
그림 5.2	빗물이용시설의 설계 방법 결정	45
그림 5.3	유입량 입력 화면	46
그림 5.4	목표 공급량 입력 화면	47
그림 5.5	공급 보장률 결정 및 분석 실행 화면	48
그림 5.6	공급 보장률별 저류 용량	50
그림 5.7	공급 보장률 78.32%일 때 저류 용량	52
그림 5.8	공급 보장률별 목표 공급량-공급량-부족량	53
그림 5.9	공급 보장률별 유입량-공급량-저류량	54
그림 5.10	경제성 분석을 위한 자료 입력	56
그림 5.11	분석 기간 30년일 때 저류 용량별 BCR	57
그림 5.12	저류 용량 4 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	61
그림 5.13	저류 용량 20 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	61
그림 5.14	저류 용량 78 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	62
그림 5.15	저류 용량 341 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	62

## 그림 목차(계속)

그림 5.16	저류 용량 1,190 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	63
그림 5.17	저류 용량 3,368 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	63
그림 5.18	저류 용량 9,363 m <sup>3</sup> 의 비용-편익 분석 결과	64



A study on determination of the capacity of rainwater harvesting unit using an optimization method and cost-benefit analysis

Hyowon Seo

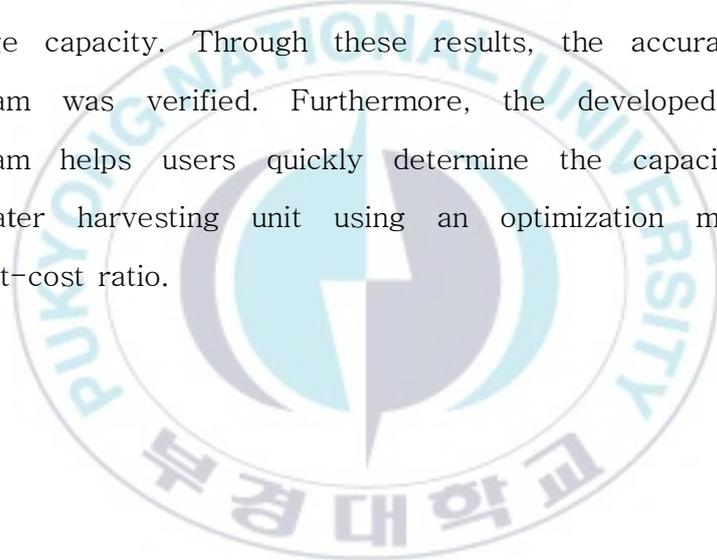
Department of Civil Engineering, The Graduate School,

Pukyong National University

## Abstract

In Korea, the impervious area has increased due to urban development since the 1960s. As the impervious area increases, flooding and water circulation distortion are occurring. To solve these water problems, rainwater harvesting unit is needed. However, it is difficult to find a program to determine the capacity of rainwater harvesting unit used by designers. In addition, a simple method is used to design the storage capacity, but it is not clear whether economic analysis is included, so the present study was conducted. one of the metaheuristic methods, Particle Swarm Optimization (PSO), was used to determine the optimal capacity of the rainwater harvesting unit, and the economic feasibility was analyzed using the benefit cost ratio (BCR) method, which is one of the cost-benefit analysis methods. In addition, the program was produced by linking the two method. For the verification of the program, the target area was selected as the rainwater storage

tank 5 of the Gwanggyo new city water circulation system construction report, and the economic feasibility was analyzed by comparing the BCR values by capacity when the analysis period was 30 years. All storage capacities were above BCR 1, and among them, the BCR of the storage capacity (341 m<sup>3</sup>) corresponding to a 60% reliability is 7.278, which is considered to be the most economical. Additionally, the cost-benefit relationship was confirmed by analyzing the payback period for each optimal storage capacity. Through these results, the accuracy of the program was verified. Furthermore, the developed computer program helps users quickly determine the capacity of the rainwater harvesting unit using an optimization method and benefit-cost ratio.



# 제1장 서론

## 1.1 연구 배경 및 목적

EU 공동연구센터에서 2021년 발표한 보고서에 의하면 유럽은 2019년부터 3년 연속으로 비정상적인 가뭄을 겪고 있으며, 이로 인해 물 부족 문제를 겪고 있다고 보고하고 있다. 또한 우리나라는 1960년대 이후 도시개발로 인해 불투수 면적이 증가하고, 지표면 증발량이 감소되어 열섬현상이 가중되는 등의 물순환 왜곡을 초래하고 있다. 이러한 물 부족과 물순환 왜곡 등의 문제를 해결하기 위한 방안으로 우리나라에서는 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률’ 제8조 제1항과 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령’ 제10조 및 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행규칙’ 제4조에 따라 특정한 규모 이상의 시설에 빗물이용시설을 설치하도록 규정하고 있다 (Kang et al., 2015). 이에 따라 서울, 인천, 수원, 세종, 부산 등의 지방자치단체에서는 빗물이용시설에 대한 설치 지원 사업을 시행하여 설치비의 90%(최대 1천만 원)까지 지원하고 있으며(Suwon City, 2016), 지자체별 지원이 시행됨에 따라 빗물이용시설의 설치 사례가 증가하고 있다. 하지만 지역 여건에 따라 빗물이용시설의 규모가 달리 결정되기 때문에 표준화하기 어렵다(Campisano and Modica, 2012). 또한 빗물이용시설의 설치에 있어서 가장 중요하게 고려해야 할 부분은 적정 용량을 산정하는 것이며, 적절 용량의 결정을 통해 경제적인 부분을 만족시켜야 한다(Han et al., 2004). 그러나 빗물저류조는 일반적으로 BCR (benefit cost ratio)이 낮게 산정되어 경제적 측면에서

는 부정적인 평가를 받고 있다(Kim et al., 2020). 그리고 저류 용량 설계에 간편식을 이용한 방법이 사용되고 있지만 경제성에 대한 분석이 포함되어 있는 것인지 명확하지 않으며, 설계자가 활용하는 용량 결정 프로그램은 국내에서 찾기가 어렵다.

이에 본 연구에서는 최적화 기법과 비용-편익 분석 기능을 갖춘 프로그램을 제작하고, 이를 활용하여 빗물이용시설의 목표 공급량에 따른 최소 저류 용량을 결정하고, 결정된 용량에 대한 비용-편익 분석의 수행을 통해 경제성을 확인하여 빗물이용시설의 활용성을 제고하고자 하였다.



## 1.2 연구 동향

빗물이용시설의 규모 결정과 경제성 분석에 관한 연구는 여러 사례가 있다. 먼저, 규모 결정에 관한 연구를 살펴보면, Lim et al.(2021)에서는 토지이용별 시나리오를 구성하고, MODSIM을 통해 최적의 시나리오에 대한 빗물저류 용량을 결정하였으며, Lee and Jung(2017)에서는 공동주택 빗물이용시설의 합리적 규모 결정을 위해 대상 단지의 수문 분석을 통해 운영 빈도를 평가하고, 규모를 산정하는 방안을 제시하였다. 그리고, Kang et al.(2010)에서는 강우와 물 사용량의 실측값을 이용하여 저류 용량에 따른 부족률을 도출하는 모의 모형을 구축하였고, 18 m<sup>3</sup>이상의 저류 용량을 가지는 빗물이용시설은 효율성이 없음을 제시하였다.

둘째, 빗물이용시설의 경제성 분석에 관한 연구를 살펴보면, Mun et al.(2012)에서는 다양한 건축물 규모에 따른 경제성 분석과 민감도 분석을 통한 경제성 향상 방안에 대한 연구를 하였고, Mun and Han(2009)에서는 실제 설치된 3,000 톤 규모 주상복합단지의 빗물이용시설을 대상으로 경제성 분석을 하였으며, Lee et al.(2012)에서는 금리와 물가 상승률을 고려한 실질 할인율 개념을 도입하여 공동주택의 빗물이용시설에 대한 경제성 분석을 하였다. 또한 Kim et al.(2014)에서는 섬 지역의 대체 수자원으로서 빗물이용의 가능성 검토 및 경제성 평가에 대한 연구를 하였다.

위의 연구들을 바탕으로 하여 본 연구는 빗물이용시설의 규모 결정과 결정된 규모에 대한 경제성 분석으로 진행되었다. 하지만 위의 연구들과 본 연구의 차이점은 규모 결정을 위한 방법으로 최적화 기법이 사용되었다는 것이다. 이를 통해 짧은 시간 내에 최적 용량을 결정하

는 것이 가능하였으며, 결정된 용량을 실제 대상의 설계 용량과 비교하여 정확성을 검증하였다. 또한, CARAH (capacity design aid for rainwater harvesting) 내 최적화 기법과 비용-편익 분석 기능을 구현하여 빗물이용시설의 규모 결정과 경제성 분석이 연속적으로 이루어지도록 한 것이 본 연구의 특징이다.



### 1.3 논문의 구성

본 연구는 최적화 기법과 비용-편익 분석을 통해 최적 용량을 결정하고 경제성을 분석하고자 하였다. 실제 대상으로서, Dongbu Engineering (2008)에 기술된 광고 신도시의 빗물저류조 5호를 선정하였고, 분석 기간 30년일 때 용량별 BCR 값을 비교하여 가장 경제적인 저류 용량을 결정하였다. 추가적으로 각각의 최적 저류 용량에 대한 비용 회수 기간을 분석함으로써 비용과 편익의 효율성 관계를 확인하였다. 논문은 다음과 같은 구성으로 작성되었다.

2장과 3장은 각각 빗물이용시설의 최적 용량 설계 방법과 빗물이용시설의 경제성 분석 방법에 관한 내용을 다루고 있다.

4장은 CARAH의 최적 용량 설계 및 경제성 분석에 관련된 입·출력 화면에 대해 설명하였다.

5장에서는 대상 지역을 선정하고, 대상의 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 설계의 정확성을 검증하고, 경제성 분석을 수행하였다.

6장은 빗물이용시설 최적 용량 설계 및 경제성 분석에 대한 결론과 향후 연구되어야 할 내용을 포함하고 있다.

## 제2장 빗물이용시설의 최적 용량 설계를 위한 방법

### 2.1 입자 군집 최적화

본 연구에서 사용된 입자 군집 최적화(particle swarm optimization; PSO) 알고리즘은 새와 물고기 무리의 사회적인 행동 양식에 대한 규칙성을 증명하기 위해 개발되었으며, 각 객체 사이의 위치와 최적해에 대한 정보를 공유하면서 전역 최적해(global optimum)를 찾아가는 메타 휴리스틱 기법 중 하나이다(Kennedy and Eberhart, 1995).

입자 군집 최적화 알고리즘과 유전 알고리즘(genetic algorithm; GA)은 군집을 기반으로 최적해를 탐색한다는 공통점을 가지고 있다. 하지만 입자 군집 최적화 알고리즘은 이웃 객체들 중 최적 해로 판단된 객체의 위치 정보를 기반으로 하여 기존 해에서 다른 해로 이동하면서 전역해를 탐색하는 반면, 유전 알고리즘은 교차 혹은 돌연변이 연산자를 이용하여 각 객체의 위치 정보를 교환하면서 전역해를 탐색한다(Han, 2016). 또한 유전 알고리즘과 비교하여 쉽게 구현되며, 조절하는 변수의 수가 적기 때문에 짧은 시간 안에 최적의 해를 찾을 수 있다는 장점이 있다(Kang et al., 2008).

입자 군집 최적화 알고리즘은 다음과 같이 4단계를 통해서 각 군집 내에 있는 입자의 위치와 속도를 결정한다. 첫 번째, 각 군집 내에서 현재 최적의 위치를 가지는 입자를 *pBest*로 설정하고 이전 위치와 비교하여 더 좋으면 위치가 있으면 갱신되고, 그렇지 않으면 유지되도록 한다. 두 번째, 각 군집 내의 *pBest*를 비교하고, 전체 군집의 최적 위

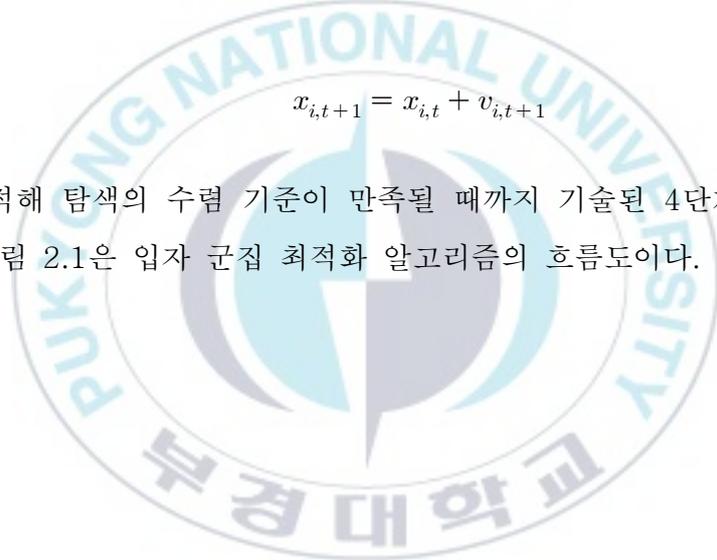
치  $gBest$ 를 평가한다. 세 번째,  $pBest$ 와  $gBest$ 를 이용하여 속도를 갱신한다. 속도에 관한 계산식은 Eq. (2.1)과 같다.

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + \alpha\epsilon_1(pBest_{i,t} - x_{i,t}) + \beta\epsilon_2(gBest_t - x_{i,t}) \quad (2.1)$$

여기서,  $i$ 는 입자의 번호,  $t$ 는 계산 횟수이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수이며,  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 는 0과 1 사이의 난수(random variable)이다. 네 번째, 입자의 위치를 갱신한다. 계산식은 Eq. (2.2)와 같다.

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \quad (2.2)$$

최적해 탐색의 수렴 기준이 만족될 때까지 기술된 4단계를 반복한다. 그림 2.1은 입자 군집 최적화 알고리즘의 흐름도이다.



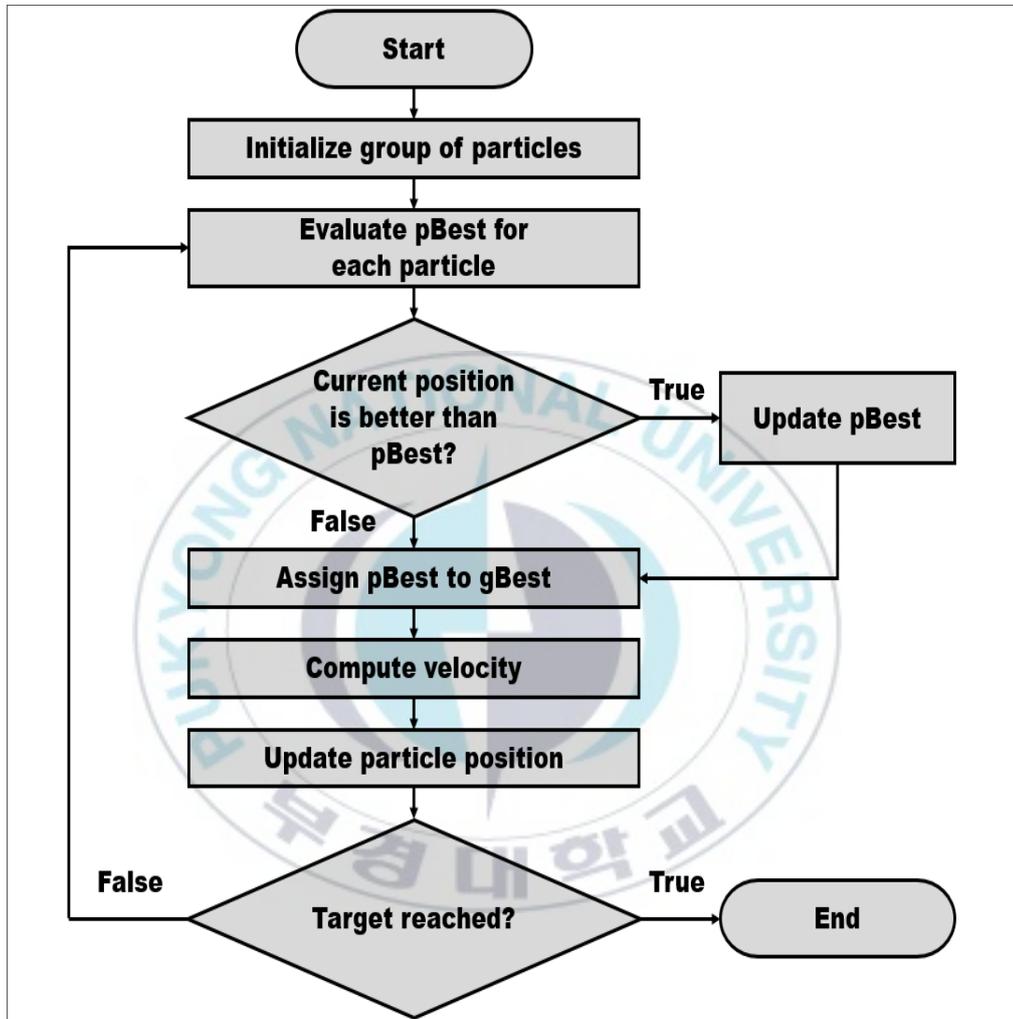


그림 2.1 입자 군집 최적화 알고리즘

Le et al. (2019)

## 2.2 저수지 모의 운영 모형

빗물이용시설의 최적 용량 결정을 위해 목표 공급량과 보장률 개념을 도입하였다. 그리고 보장률은 모의 운영에 의해 계산되므로 빗물이용시설에 대한 모의 운영 모형을 구성하였다. 모의 운영 모형의 구성을 위하여 저수지 질량 보존식(reservoir mass balance equation)이 사용되었고, 공급량과 방류량은 저류 용량, 가용 수량, 목표 공급량 등을 고려하여 결정되었다. 표 2.1은 빗물이용시설 모의 운영 모형에 이용된 수식에 대해 정리한 것이다. 표 2.1에서 수식의 하첨자로 사용된  $t$ 는 일 단위의 모의 운영 시간 간격이며,  $I_t$ ,  $R_t$ ,  $S_t$ ,  $T_t$ ,  $Y_t$ 는 기간  $t$ 의 유입량(inflow), 방류량(release), 저류량(storage), 목표 공급량(target draft), 공급량(yield)이고,  $C$ 는 저류 용량(capacity)을 나타낸다(Jin et al., 2020).

표 2.1 빗물이용시설 모의 운영 모형의 수식

구분	모의 운영 모형	
	조건	수식
질량 보존식	-	$S_t = S_{t-1} + I_t - Y_t - R_t$
공급량 결정	$S_{t-1} + I_t \geq T_t$	$Y_t = T_t$
	$S_{t-1} + I_t \leq T_t$ , and $S_{t-1} \neq 0$	$Y_t = S_{t-1}$
	$S_{t-1} + I_t \leq T_t$ , and $S_{t-1} = 0$	$Y_t = 0$
방류량 결정	$S_{t-1} + I_t - Y_t \geq C$	$R_t = S_{t-1} + I_t - Y_t - C$
	$S_{t-1} + I_t - Y_t < C$	$R_t = 0$

Jin et al. (2020)

## 2.3 최적화 알고리즘

입자 군집 최적화 알고리즘을 구성하는 여러 가지의 언어 중 오픈 소스로 제공되며, 제약 조건식을 고려할 수 있어 다양한 최적화 문제에 적용할 수 있는 장점을 가진 Python의 pyswarm을 이용하였다.

목표 보장률에 따른 최소 저류 용량을 결정하기 위한 수식은 총 3개로 최소 저류 용량을 결정하는 목적함수 Eq. (2.3), 저류 용량에 따라 모의된 보장률이 목표 보장률 이상인 제약조건 Eq. (2.4), 저류 용량에 따라 모의된 보장률을 산정하기 위한 Eq. (2.5)로 구성된다 (Korea Institute of Construction Technology, 2004).

$$\text{Minimize } C \quad (2.3)$$

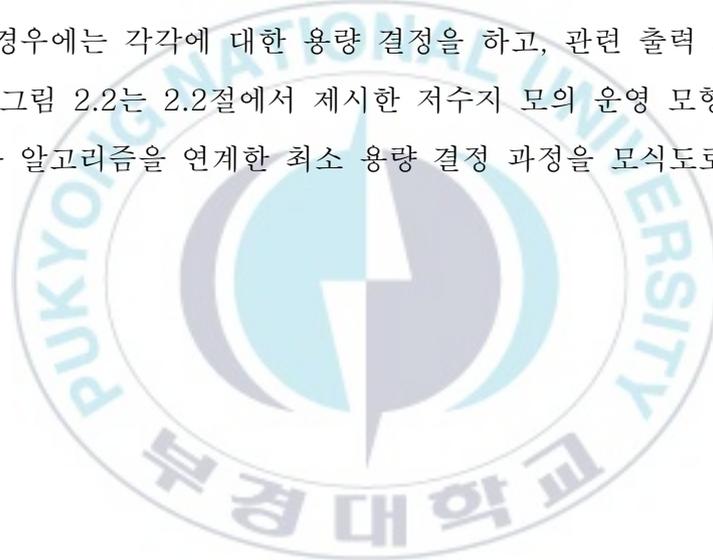
$$R_{Sim} - R_{Tar} \geq 0 \quad (2.4)$$

$$R_{Sim} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N L_t}{N} \quad (2.5)$$

여기서,  $R_{Sim}$  과  $R_{Tar}$  는 각각 모의된 보장률과 목표 보장률이며,  $N$  은 총 모의 기간,  $L_t$  는 기간  $t$  일 때, 저류량이 0인 경우 '1', 0이 아닌 경우 '0' 의 값을 갖는 논리 변수이다.

## 2.4 최적화 알고리즘을 이용한 최소 용량 결정 과정

최적화 알고리즘으로 빗물이용시설의 최소 용량을 결정하는 과정은 다음과 같다. 먼저 유입량 시계열, 목표 공급량 시계열, 목표 보장률이 입력되어야 한다. 이후 빗물이용시설은 입력된 자료를 토대로 모의 운영되며, 최적화 알고리즘에 따라 용량을 결정하게 된다. 마지막으로, 결정된 용량에 대한 용수 공급 시계열과 용수 공급 부족 시계열 그리고 저류량 시계열 등을 출력한 후 종료된다. 다수의 목표 보장률을 입력한 경우에는 각각에 대한 용량 결정을 하고, 관련 출력 자료를 생성한다. 그림 2.2는 2.2절에서 제시한 저수지 모의 운영 모형과 2.3절의 최적화 알고리즘을 연계한 최소 용량 결정 과정을 모식도로 나타낸 것이다.



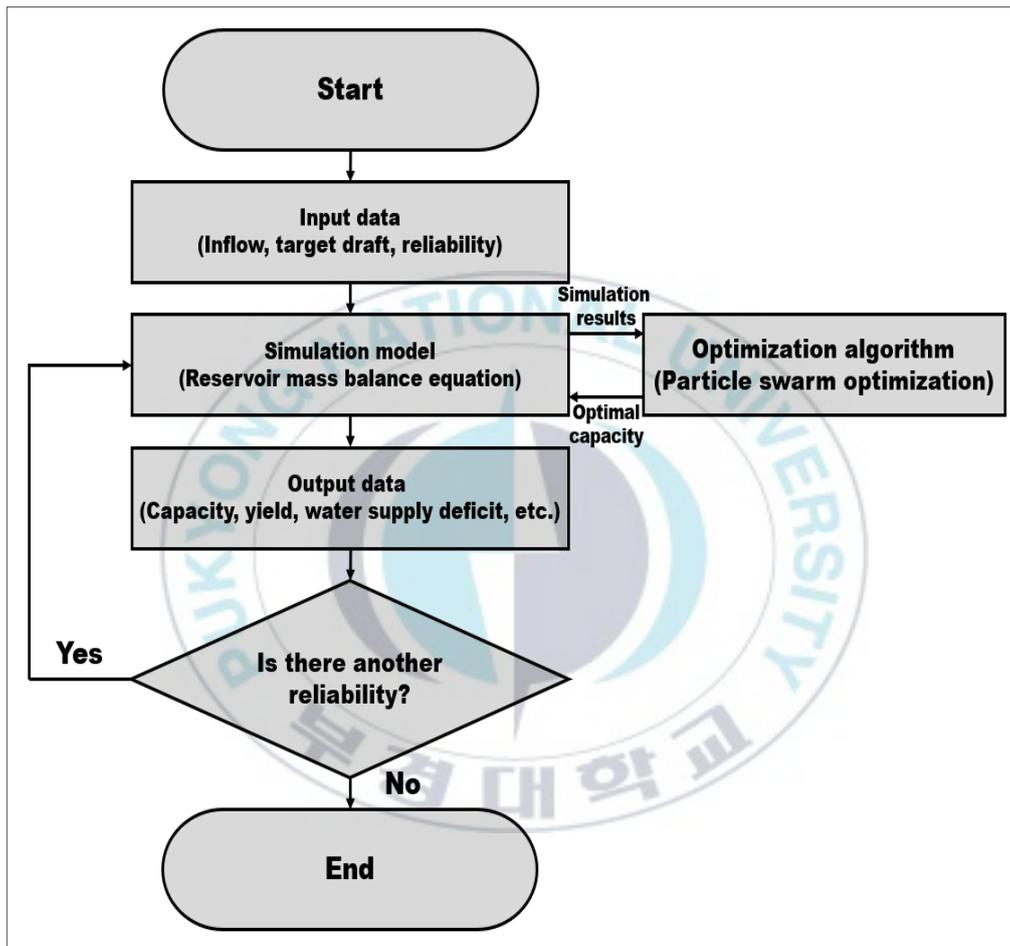


그림 2.2 빗물이용시설의 용량 결정 과정

Jin et al. (2020)

## 제3장 빗물이용시설의 경제성 분석을 위한 방법

### 3.1 경제성 평가

경제성 평가는 사업의 실행을 위해 투입되는 비용(cost)과 사업을 통해 발생하는 편익(benefit)의 비교를 통해 경제적 측면의 사업 타당성을 확인하기 위해 실시하고, 분석 결과 투자 비용보다 기대 편익이 크면 경제적 타당성이 있는 것으로 평가한다. 경제성 평가를 위한 비용-편익 분석 방법에는 현재가치법, 비용편익 비율법, 내부수익률법이 있으며, 본 연구에서는 여러 가지 사업의 객관적 비교가 가능한 비용 편익 비율법을 이용하였다(Shim, 2000).

### 3.2 비용편익 비율법

비용편익 비율법의 수식은 편익의 현재 가치가  $PV_B$  (present value of benefit)이고,  $PV_C$  (present value of cost)일 때, Eq. (3.1)과 같다.

$$BCR = \frac{PV_B}{PV_C} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^{t-1}}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^{t-1}}} \quad (3.1)$$

여기서,  $t$ 는 분석 기간,  $r$ 은 할인율이다. 분석 기간  $t$ 는 내용연수를 고려하여 결정하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 표 3.1은 지방공기업법 시행규칙' 제19조 1항 1호 관련 건축물 등의 내용연수표를 참고하여 작성된 표이며, 빗물이용시설에 대한 분석 기간의 결정이 가능하다 (Ministry of Environment, 2011).

표 3.1 건축물 등의 내용연수표

구분	내용연수
건축물과 건축물	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 철골·철근콘크리트조, 철근콘크리트조, 석조, 연와석조, 철골조의 모든 건물(부속설비를 포함한다)과 건축물: 40년</li> <li>· 토목시설 및 수도 시설: 30년(취수시설, 도수시설, 정수시설, 배수시설 등)</li> </ul>
관거	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 강관, 주철관, 스텐레스관: 30년</li> <li>· PE관, PVC관: 20년</li> <li>· 아연도강관: 10년</li> <li>· 그 밖의 관: 20~30년</li> <li>· 수도관 부속설비: 20~30년</li> <li>· 구조물시설(BOX 등): 30년</li> <li>· 그 밖의 하수관거시설(흙관, VR관, PC관, PE관 등): 20년</li> </ul>
수처리시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 침사지, 1차 침전지, 2차 침전지, 유입펌프장, 생물반응조, 소독 및 방류시설, 처리수 재이용시설: 30년</li> </ul>
슬러지처리시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 소화조, 농축조, 탈수기동, 저류조: 20년</li> </ul>

Ministry of Environment. (2011)

할인율  $r$ 은 시간에 가격을 부과하는 것으로, 할인율이 높을수록 미래에 발생하는 편익의 현재가치는 낮아진다(Lee and Kim, 2015). 할인율과 관련하여 우리나라에서는 ‘예비 타당성조사 수행 총괄 지침’ 제52조에 따라 사회적 할인율을 4.5%로 적용하고 있다.

비용편익 비율법을 이용한 경제성 분석을 위해서는 비용과 편익을 정량적으로 결정할 수 있어야 한다. 비용은 빗물이용시설의 운영에 필연적으로 발생하게 되는데, 이는 빗물이용시설의 설치비와 시설의 운영 및 유지관리에 필요한 인건비 및 경비, 펌프 시설 이용에 따른 전기 요금 등이 해당한다. 또한, 국내의 주요 지방자치단체에서는 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 조례’ 등을 두어 빗물이용시설의 설치비 지원과 수도 요금의 감면을 제공하고 있으므로 이는 편익으로 고려될 수 있다. 이와 관련하여 빗물이용시설의 설치 및 운영에 따른 비용과 편익에 대한 항목을 정리하였다(표 3.2).

표 3.2 경제성 분석을 위한 비용 및 편익 항목

구분	항목	비고
비용 (cost)	설치비	토목·건축공사비, 용지매입비, 배관설비비 등
	유지관리비	전력비, 인건비, 보수비 등
편익 (benefit)	설치비 지원금	지자체별 상이 (인천시: 전액 또는 일부)
	상수도 요금 감면액	지자체별 상이 (인천시: 빗물이용량의 10%)
	하수도 요금 감면액	지자체별 상이 (인천시: 빗물이용량의 10%)
	물이용부담금 감면액	지자체별 상이 (인천시: 빗물이용량의 10%)
	상수도 대체에 따른 수도 요금 절감액	빗물이용량에 대해 부과되는 수도 요금

### 3.3 비용과 편익의 산정

먼저, 빗물이용시설의 설치 및 운영에 소요되는 비용은 Eq. (3.2)와 같이 설치비와 유지관리비의 합으로 산정된다.

$$C(t) = C_c + C_{om}(t) \quad (3.2)$$

여기서,  $C(t)$ 는 기간  $t$ 의 총비용(total cost),  $C_c$ 는 설치비(construction cost),  $C_{om}(t)$ 는 기간  $t$ 의 유지관리비(operation and maintenance cost)이다. 빗물이용시설의 설치비에는 토목·건축공사비, 용지매입비, 배관 설비비 등이 포함될 수 있고, 유지관리비에는 전력비, 인건비, 보수비 등이 포함된다. 이러한 빗물이용시설의 설치비 및 유지관리비는 설치 지역과 환경, 운영 방법뿐만 아니라 재질, 구조 등에 따라 크게 달라지므로 빗물이용시설의 설치 및 유지관리 비용을 예상하는 것은 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 (Lee et al., 2012)에서 제시한 설치비와 유지관리비에 관한 표 3.3~3.5를 참고하였다.

표 3.3 빗물이용시설 타입별 초기 설치비

구분	조립식	현장타설	PC제품
공사기간	20일/1,000 m <sup>3</sup>	90일/1,000 m <sup>3</sup>	40일/1,000 m <sup>3</sup>
재질	PP(폴리프로필렌)	콘크리트	콘크리트
단가	450,000원/m <sup>3</sup>	350,000원/m <sup>3</sup>	450,000원/m <sup>3</sup>

표 3.4 조립식 빗물이용시설에 대한 초기 설치비의 상세내역

계 (천원/m <sup>3</sup> )	자재비(천원/m <sup>3</sup> )				공사비(천원/m <sup>3</sup> )				
	소계	주철	플라 스틱	레진	소계	토공	기초공	시트 설치	구조물 설치
450	379	84	212	83	71	16	7	30	18

표 3.5 빗물이용시설 타입별 유지관리비

구분		조립식	현장타설	PC제품
유 지 관 리 비	계	설치비의 2.0%/년	설치비의 2.0%/년	설치비의 2.0%/년
	전기요금	설치비의 0.3%/년	설치비의 0.3%/년	설치비의 0.3%/년
	수량수질 모니터링	설치비의 0.7%/년	설치비의 0.7%/년	설치비의 0.7%/년
	보수/인건비 /기타	설치비의 1.0%/년	설치비의 1.0%/년	설치비의 1.0%/년

또한, Daejeon Metropolitan City (2010)에서는 대전광역시에서 빗물이용시설의 설치를 지원한 자료를 토대로 빗물이용시설의 규모에 따른 설치 비용의 관계를 그림 3.1과 같이 제시하였고, 유사하게 빗물 이용시설의 규모에 따른 유지관리비의 관계를 그림 3.2와 같이 제시하였다. 따라서, 계획된 빗물이용시설의 규모에 따른 설치비와 유지관리비를 직접적으로 결정하기 어려운 경우에는 그림 3.1과 그림 3.2에서 제시된 관계에 따라 빗물이용시설의 계획 규모에 따른 개략적인 비용을 결정할 수 있다.



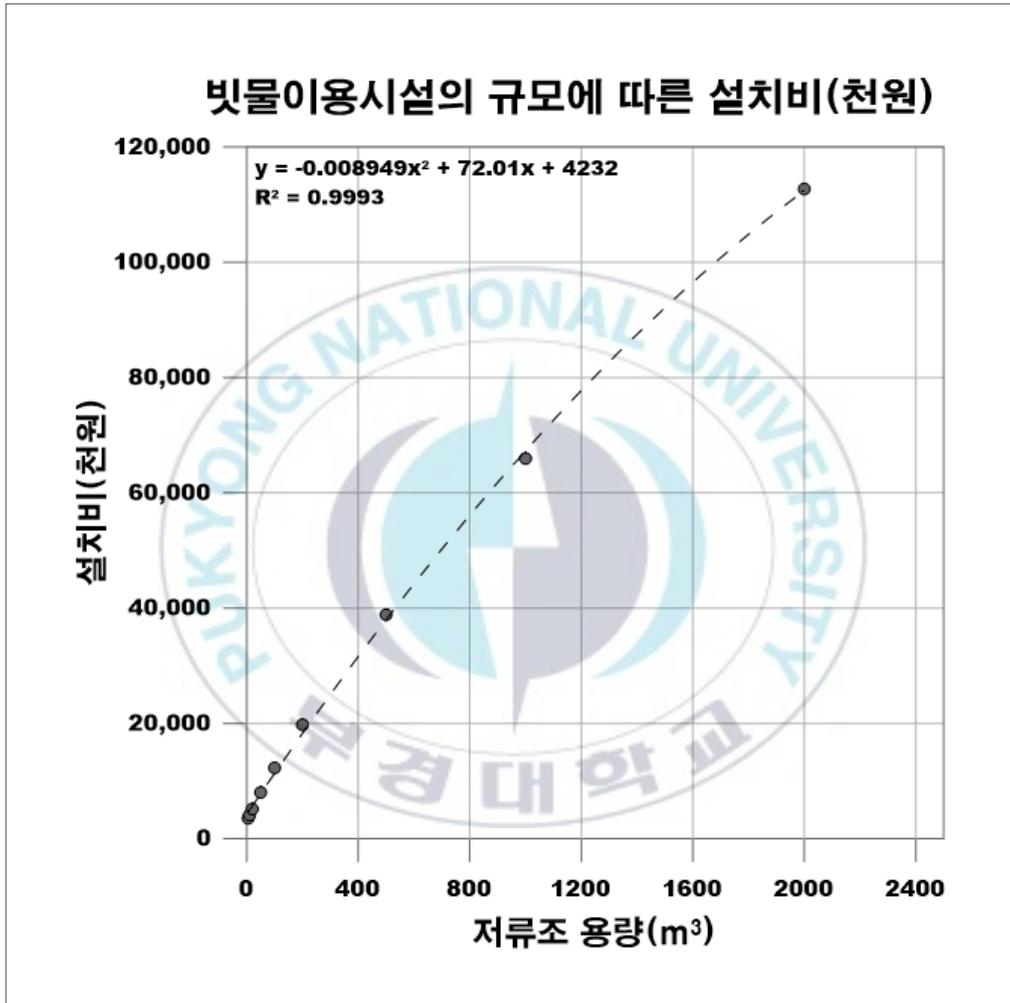


그림 3.1 빗물이용시설의 규모에 따른 설치비

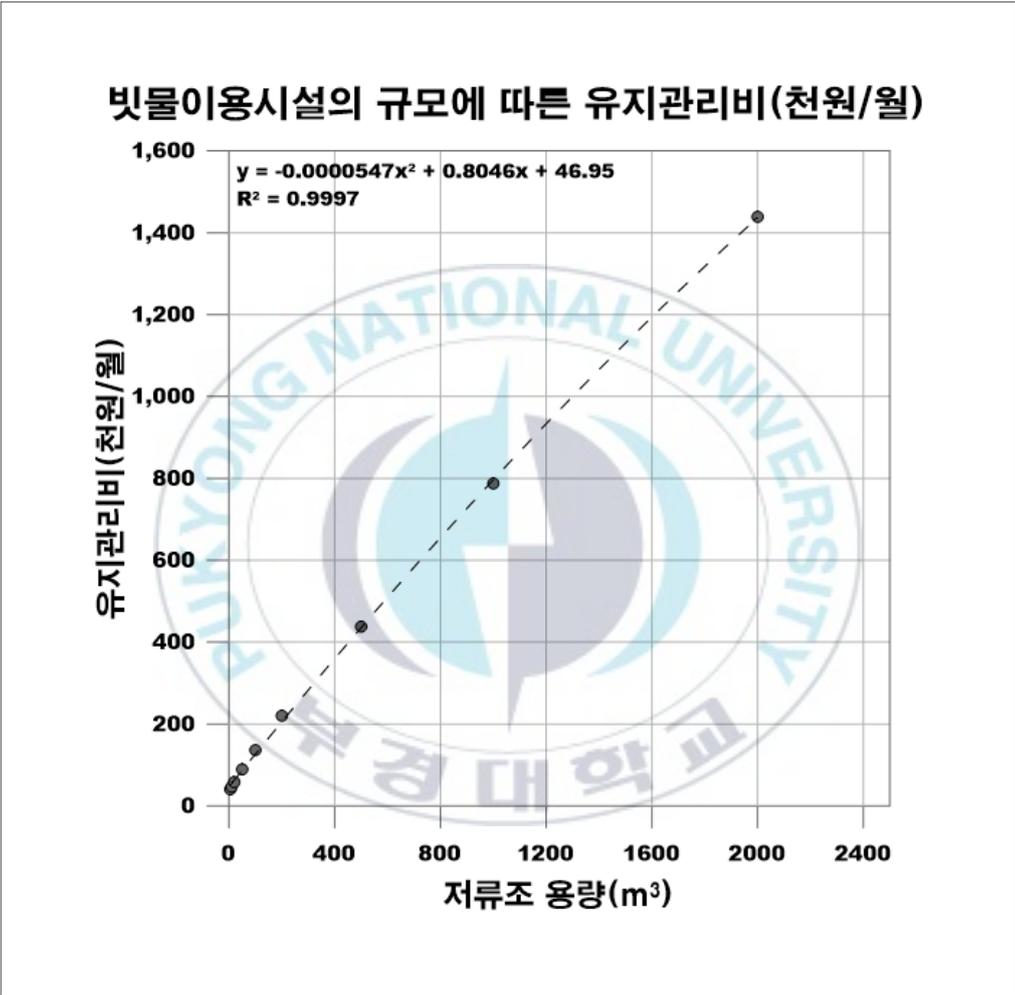


그림 3.2 빗물이용시설의 규모에 따른 유지관리비

빗물이용시설의 설치 및 운영으로 얻을 수 있는 편익에 대한 내용을 제시하기에 앞서 상·하수도 요금의 산정 방법에 대한 이해가 필요하다.

표 3.6은 인천시 상수도 사업본부 홈페이지에서 제공하는 요금 시뮬레이션 기능을 이용한 수도 사용료의 계산 사례로서, 계량기의 구경은 200 mm, 상수도 업종은 일반용, 하수도 업종은 업무용, 상수도 사용량은 1,000 m<sup>3</sup>로 가정한 결과이다. 이를 통해 수도 요금 산정 방법을 확인하였다.

수도 요금은 구경별 정액요금, 상수도 요금, 하수도 요금, 물이용부담금으로 구성된다. 구경별 정액요금은 계량기의 구경에 따라 결정되는데, 계량기의 구경은 ‘인천시 급수공사 사무 취급 규정’ 별표 3의 구경별 유량 기준표인 표 3.7을 참고하여 결정할 수 있다. 상수도 요금과 하수도 요금은 각각 표 3.8, 3.9와 같이 업종과 사용량에 따라 사용료의 단가(원/m<sup>3</sup>)가 달라진다. 물이용부담금은 ‘한강수계 물이용 부담금 부과율’ 제2조에 따라 상수도 사용량에 비례하여 m<sup>3</sup>당 170 원이 부과된다.

표 3.6 상수도 사용량 1,000 m<sup>3</sup>일 때 수도 요금 시뮬레이션 결과

계산 내역	
구경별 정액요금	180,000원
상수도	$300 \text{ m}^3 \times 870\text{원/m}^3 = 261,000\text{원}$ $700 \text{ m}^3 \times 1,120\text{원/m}^3 = 784,000\text{원}$
하수도	$50 \text{ m}^3 \times 490\text{원/m}^3 = 24,500\text{원}$ $50 \text{ m}^3 \times 510\text{원/m}^3 = 25,500\text{원}$ $200 \text{ m}^3 \times 1,010\text{원/m}^3 = 202,000\text{원}$ $200 \text{ m}^3 \times 1,100\text{원/m}^3 = 220,000\text{원}$ $500 \text{ m}^3 \times 1,130\text{원/m}^3 = 565,000\text{원}$
물이용부담금	$1,000 \text{ m}^3 \times 170\text{원/m}^3 = 170,000\text{원}$
합계	상수도 + 하수도 + 물이용부담금 = 2,432,000원

표 3.7 구경별 유량 기준표

구경 (mm)	75	100	150	200	250	300	350	400	500	600
유량 (m <sup>3</sup> /일)	92	245	780	1,654	3,096	5,008	7,563	10,860	19,517	31,017

표 3.8 인천시의 상수도 요금표

(금액 단위: 원)

구분		업종별 사용요금				주요업태
구경별	요금	업종	사용량 (m <sup>3</sup> /월)	요금 (m <sup>3</sup> 당)	차액	
15 mm	990	가정용	1 m <sup>3</sup> 당	470	-	-
20 mm	2,400					
25 mm	3,900	일반용	1~300	870	-	학교: m <sup>3</sup> 당 830원 적용; 군부대, 제조업소: 2단계 요금은 m <sup>3</sup> 당 940원 적용
32 mm	6,900					
40 mm	12,000					
50 mm	18,000					
80 mm	35,000					
100 mm	59,000	욕탕용	1~1,000	590	-	호텔 목욕장, 24시목욕장, 및 찜질전문 목욕장: m <sup>3</sup> 당 990원 적용
150 mm	127,000					
200 mm	180,000					
250 mm	240,000					
300 mm	330,000					
350 mm	420,000					
400 mm	500,000					
이상			3,001 이상	990	760,000	

표 3.9 인천시의 하수도 요금표

(금액 단위: 원)

구분	사용량 (m <sup>3</sup> /월)	요금 (m <sup>3</sup> 당)	차액	주요업태
가정용	1~10	350	-	10 m <sup>3</sup> 미만의 업소, 사회복지시설 등
	11~20	560	2,100	
	21 이상	860	8,100	
업무용	1~50	490	-	국가 및 지방자치단체, 학교, 정당 등
	51~100	510	1,000	
	101~300	1,010	51,000	
	301~500	1,100	78,000	
	501~100	1,130	93,000	
	1,001 이상	1,160	123,000	
영업용	1~50	830	-	공연장, 숙박업, 백화점, 주차장, 예식장, 학원, 사진현상소 등
	51~100	860	1,500	
	101~300	1,720	87,500	
	301~500	1,800	111,500	
	501~100	1,850	136,500	
	1,001 이상	1,900	186,500	
욕탕용	1~1,000	430	-	24시 목욕장, 관광호텔 목욕장 및 찜질 전문 목욕장: m <sup>3</sup> 당 1,080원
	1,001~3,000	720	290,000	
	3,001 이상	1,080	1,370,000	
산업용	1 m <sup>3</sup> 당	640	-	한국표준 산업분류에 의한 제조업체

빗물이용시설의 설치와 운영을 통해 얻을 수 있는 직접적인 편익은 상수도를 대체하여 빗물을 이용함에 따라 절감된 상수도 사용량에 해당하는 수도 요금이다. 또한, 지자체별 빗물이용시설의 설치 및 관리에 관한 조례 등에 따라 여러 지자체에서는 빗물이용시설 설치비의 일부 또는 전부를 지원하고 있고, 수도 요금을 감면해 주고 있다(표 3.10).

표 3.10 지자체별 빗물이용시설의 설치비 지원 및 빗물 이용에 따른 요금 감면

구분	설치비 지원	상수도 요금 감면	하수도 요금 감면	물이용부담금 감면
서울시	전부 또는 일부	-	-	-
인천시	전부 또는 일부	빗물이용량의 최대 10%	빗물이용량의 최대 10%	빗물이용량의 최대 10%
수원시	설치 비용의 90% (최대 1천만 원)	빗물이용량의 일부	빗물이용량의 일부	빗물이용량의 일부
세종시	전부 또는 일부	빗물이용량의 10%	빗물이용량의 30%	-
부산시	설치 비용의 90% (최대 1천만 원)	빗물이용량의 10%	-	빗물이용량의 10%

이에 따라 빗물이용시설의 설치와 운영에 따른 편익은 Eq. (3.3)과 같이 구성된다.

$$B(t) = Sub + [Ex_s(t) + Ex_w(t) + Ex_c(t)] + Sav(t) \quad (3.3)$$

여기서,  $B(t)$ 는 기간  $t$ 의 총편익(total benefit),  $Sub$ 는 설치비 지원금(subsidy),  $Ex_s(t)$ 는 기간  $t$ 의 수도 요금 감면액(exemption)으로서 하첨차  $s$ 와  $w$ ,  $c$ 는 각각 상수도(water supply), 하수도(wastewater), 물이용부담금(water usage charge)을 뜻하며,  $Sav(t)$ 는 기간  $t$ 의 상수도 대체에 따른 수도 요금 절감액(saving)을 뜻한다.

빗물 이용에 따른 수도 요금 감면액은 수도 사용료에 부과되는 상수도 요금, 하수도 요금, 물이용부담금에 대하여 모두 적용된다. 빗물 이용시설 이용에 따른 하수도 요금 감면액의 계산 사례로서, 하수도 사용료가 100원이고 감면 비율이 30%인 경우 최종 하수도 사용료는 70원을 부과하게 되는데, 계산식은 아래와 같다.

$$\text{하수도사용료}(100 \text{ 원}) - \text{감면액}(\text{하수도사용료}100 \text{ 원} \times \text{감면 비율}30\%) = 70 \text{ 원}$$

상수도 대체에 따른 수도 요금 절감액의 계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{상수도 대체에 따른 수도 요금 절감액(원)} \\ & = \text{빗물 이용량}(m^3) \times \text{수도 요금 단가(원}/m^3) \end{aligned}$$

이때, 상수도 대체에 따른 수도 요금 절감액은 수도 사용료에 부과되는 상수도 요금, 하수도 요금, 물이용부담금에 대하여 모두 적용된다.

## 제4장 CARAH의 사용자 편의 환경 구현

### 4.1 CARAH의 소개 및 구성

빗물이용시설의 저류 용량 설계 프로그램인 CARAH는 최적화 알고리즘 기반의 엔진과 경제성 분석 기능을 갖추고 있으며, 빗물이용시설의 용량 결정에 대한 실무 활용성을 높이려는 목적으로 외부 인력과 의 협업을 통해 제작되었다. 또한, C#의 서드파티인 Devexpress의 상용 프로그램을 도입하여 높은 편의성과 통일성 있는 사용자 편의 환경(graphical user interface; GUI)을 제공한다.

CARAH는 입력을 위한 탭과 출력을 위한 탭으로 구성되어 있다. 기본 정보, 유입량 산정, 목표 공급량, 공급 보장률 탭은 입력을 위한 화면(그림 4.1~4.4)이고, 입력 후 분석 실행 화면은 그림 4.5이며, 공급 보장률-저류 용량, 목표 공급량-공급량-부족량, 유입량-공급량-저류량 탭은 출력을 위한 화면(그림 4.6~4.8)이다.

## 4.2 최적 용량 설계를 위한 사용자 편의 환경 구현

### 4.2.1 CARAH의 최적 용량 설계 입력 화면

CARAH의 기본 설정 화면은 그림 4.1과 같으며, 설정 초기화, 프로젝트 불러오기, 프로젝트 저장하기, 프로그램 종료하기의 4가지 기능을 우측 상단의 버튼을 통해 사용할 수 있으며, 프로젝트의 제목과 모의 기간, 유입량과 목표 공급량, 공급 보장률의 입력 방법을 간략하게 설정할 수 있다.



그림 4.1 CARAH의 기본 설정 탭

그림 4.2는 유입량 산정 탭의 화면이다. 사용자는 유입량을 직접 입력할 수 있고, 집수면적과 유출계수, 강우량의 입력을 통한 유입량 산정이 가능하다. 그리고, 우측의 그래프를 통해 자료가 올바르게 입력되었는지 한눈에 확인할 수 있으며, 우측 상단 표 저장과 그림 저장 버튼을 통해 표와 그래프를 각각 저장할 수 있다.

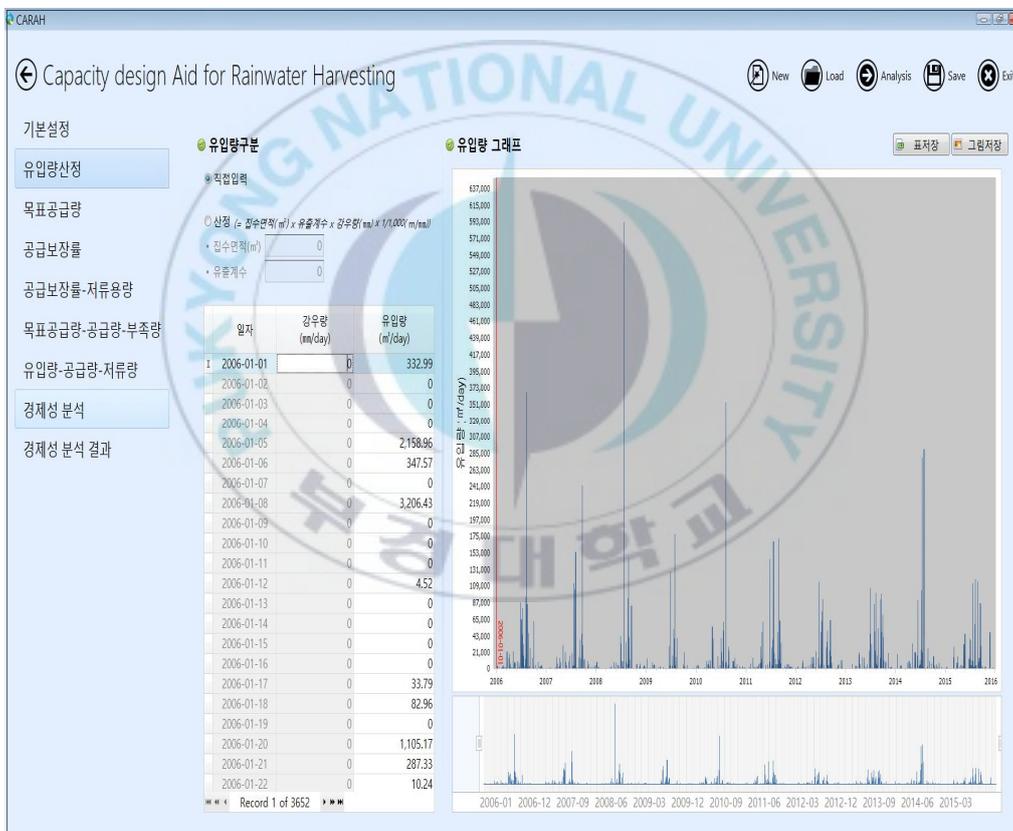


그림 4.2 CARAH의 유입량 산정 탭

그림 4.3은 목표 공급량 탭의 화면이고, 용수 용도에 따라 개별적으로 목표 공급량의 입력이 가능하며, 목표 공급량의 합계만을 입력할 수도 있다. 유입량 산정 탭과 마찬가지로 입력한 목표 공급량을 그래프로 확인할 수 있고, 그래프 내 체크박스를 이용하면 각각의 용도별 용수의 목표 공급량도 확인할 수 있다.

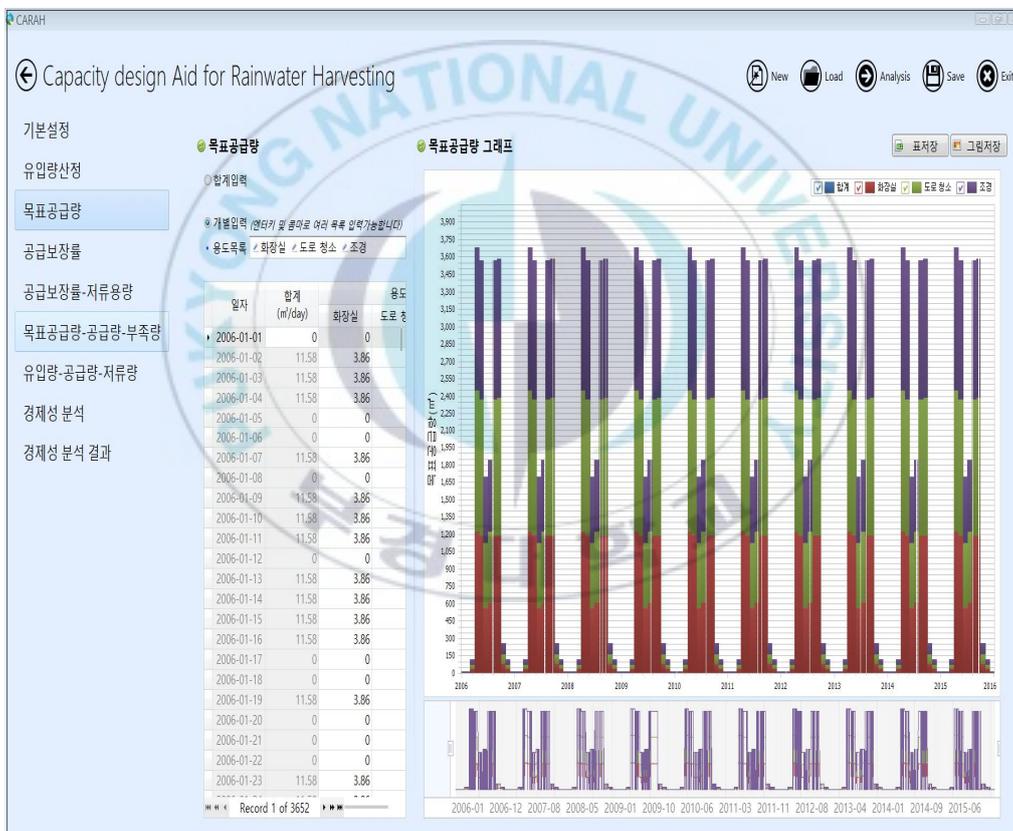


그림 4.3 CARAH의 목표 공급량 탭

그림 4.4는 공급 보장률 탭의 화면이고, 유입량과 목표 공급량을 모두 입력한 후 공급 보장률 탭으로 화면 전환 시, 공급 보장률의 최댓값이 자동으로 산정되어 나타난다. 사용자가 확인하고자 하는 공급 보장률을 단일 혹은 다중으로 선택할 수 있으며, 최종적으로 DATA ANALYSIS 버튼을 통해 최적 용량의 탐색을 수행하게 된다. 분석 실행 화면은 그림 4.5와 같다.

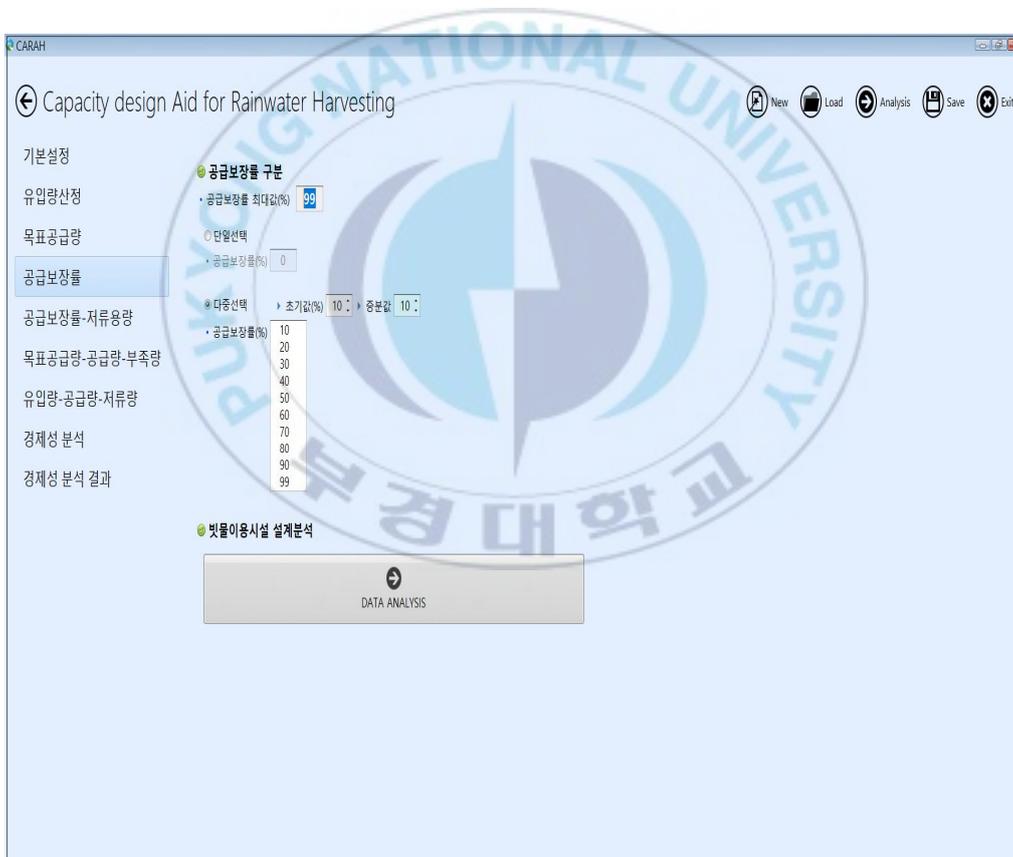


그림 4.4 CARAH의 공급 보장률 탭

 Capacity design Aid for Rainwater Harvesting



⚙ 분석 모듈이 실행중입니다.



목표 공급 보장률: 10.0%, 저류지 용량: 300.41, 공급 보장률: 0.097

그림 4.5 CARAH의 분석 실행 화면

#### 4.2.2 CARAH의 최적 용량 설계 출력 화면

그림 4.6은 공급 보장률-저류 용량 탭의 화면이고, 입력된 자료에 의해 결정된 공급 보장률에 대한 최소 저류 용량을 계산하고, 그 결과를 표와 그래프로 출력한다.

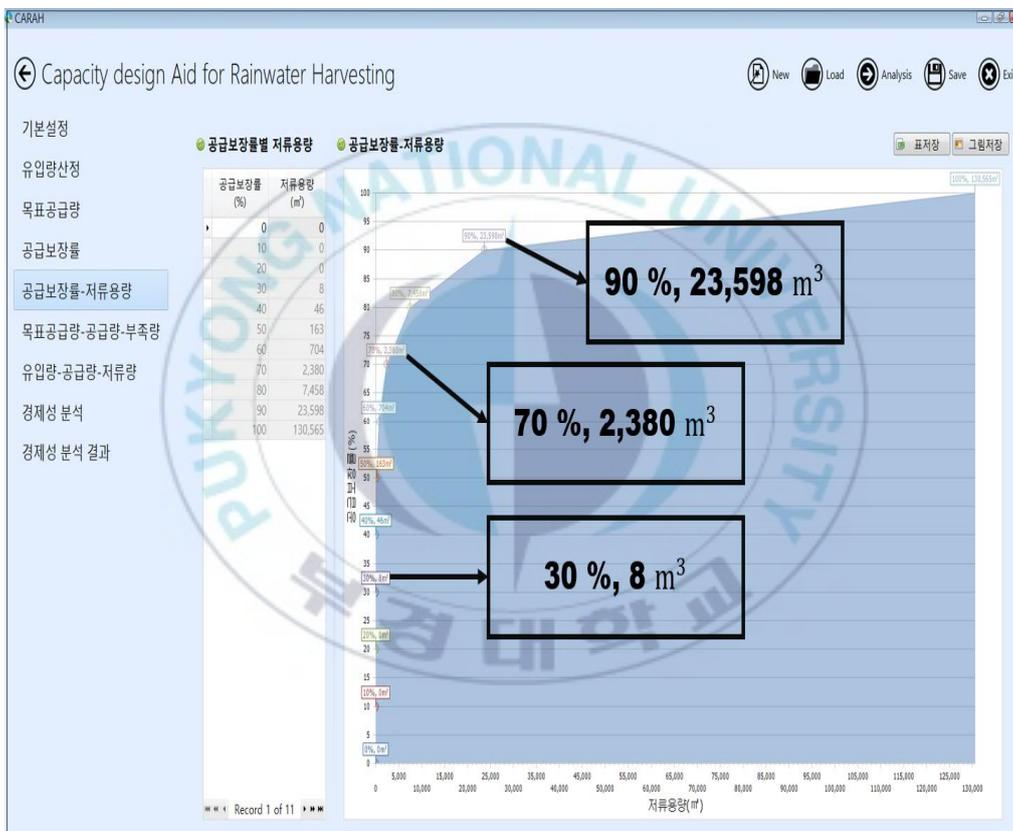


그림 4.6 CARAH의 공급 보장률-저류 용량 탭

그림 4.7은 목표 공급량-공급량-부족량 탭의 화면이고, 공급 보장에 따른 목표 공급량과 공급량, 부족량의 결괏값을 표와 그래프로 출력한다.

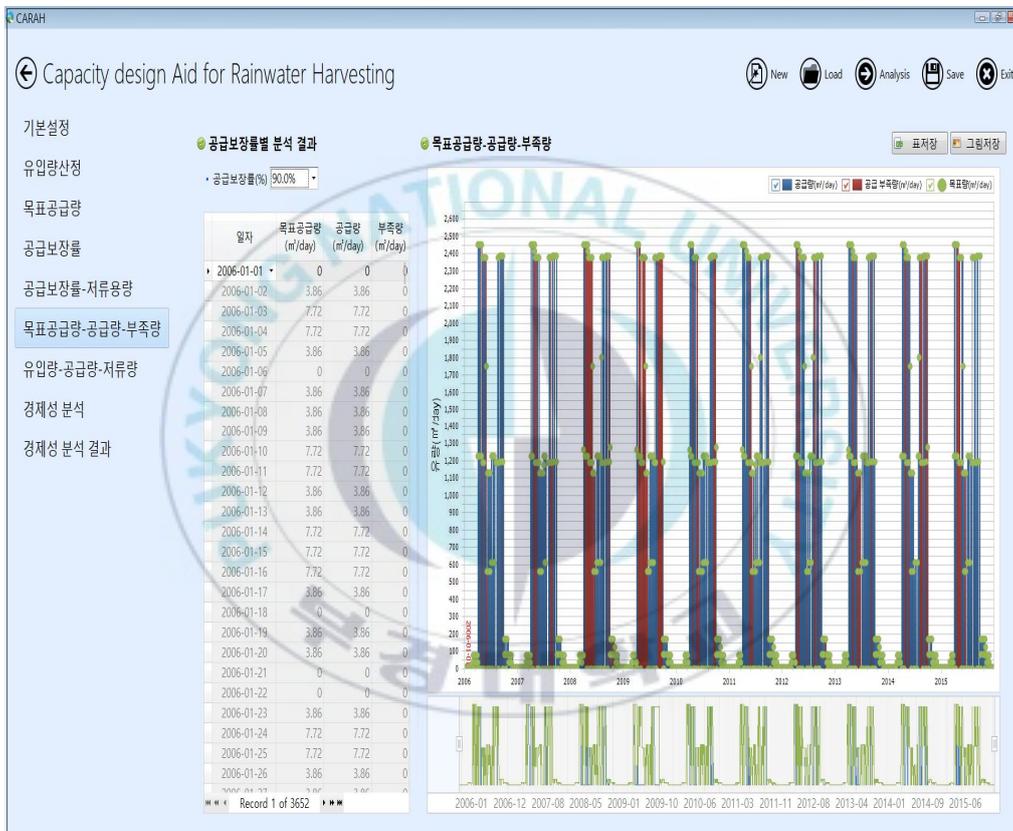


그림 4.7 CARAH의 목표 공급량-공급량-부족량 탭

그림 4.8은 유입량-공급량-저류량 탭의 화면이고, 공급 보장률에 따른 유입량과 공급량, 저류량의 결괏값을 표와 그래프로 출력한다.

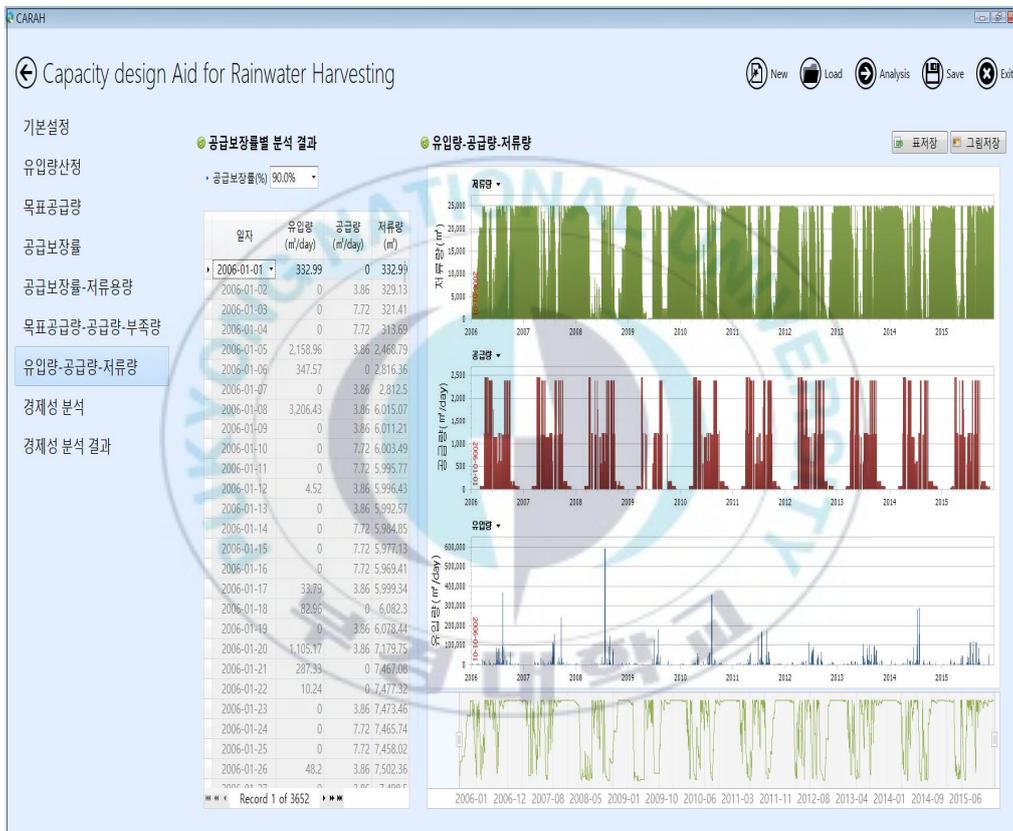


그림 4.8 CARAH의 유입량-공급량-저류량 탭

## 4.3 경제성 분석을 위한 사용자 편의 환경 구현

### 4.3.1 CARAH의 경제성 분석 입력 화면

비용편익 비율법을 CARAH 내에 구현하여 경제성 분석을 하기 위해서는 설계자가 분석하고자 하는 저류 용량( $m^3$ ), 분석 기간(년), 할인율(%), 비용, 물가 상승률(%), 편익, 수도 요금 상승률 등의 정보가 필요하다. 위의 항목들이 입력 자료가 되며, 그림 4.9와 같이 경제성 분석 탭이 구성되어 있다.

저류 용량은 CARAH의 최적화 기법을 이용하여 산정된 용량 중 하나를 사용자가 선택할 수 있고, 분석 기간과 할인율은 직접 입력할 수 있도록 구성되어 있다. 분석의 오류를 막기 위해서 최소 분석 기간은 10년 이상, 할인율은 ‘예비 타당성조사 수행 총괄 지침’ 제52조에 따라 사회적 할인율인 4.5%를 권장한다. 설치비와 유지관리비는 사용자가 직접 입력하거나, 빗물이용시설의 규모에 따른 회귀식을 이용하여 자동으로 산정할 수 있고, 유지관리비 상승률은 물가 상승률, 시간당 최저 임금 상승률 등을 고려하여 직접 입력할 수 있다. 편익은 사용자가 직접 입력할 수도 있지만, 지역 선택을 통해 설치비 지원금, 수도 요금 감면액, 상수도 대체에 따른 절감액이 자동으로 산정된다. 수도 요금 감면액과 상수도 대체에 따른 절감액은 분석 기간 내 동일한 월(月)의 전체 공급량에 대한 평균과 월별 단가의 곱으로 계산된다.

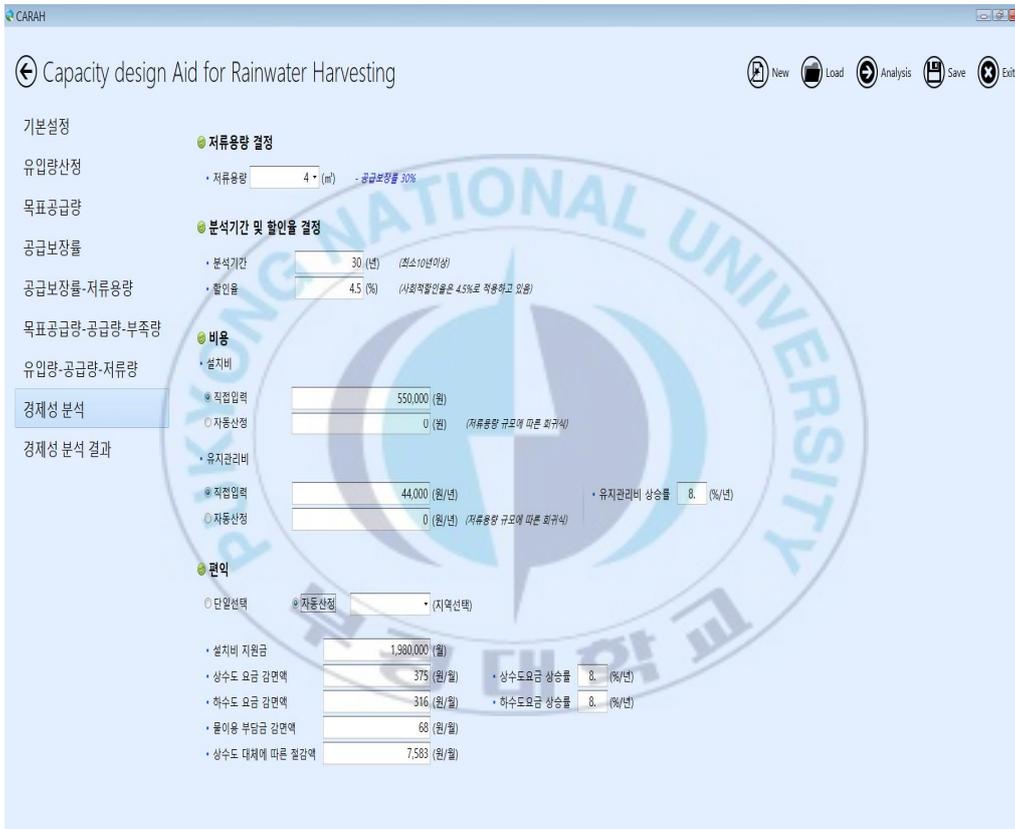
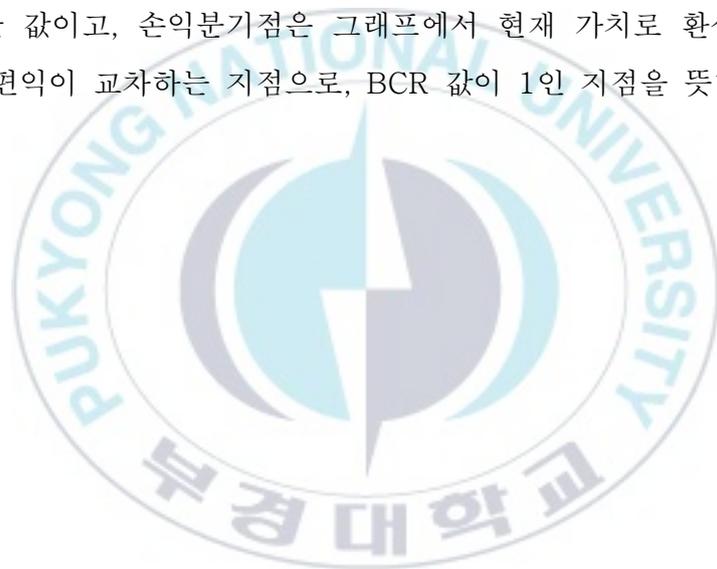


그림 4.9 CARAH의 경제성 분석 입력 화면

#### 4.3.2 CARAH의 경제성 분석 출력 화면

그림 4.10은 경제성 분석 결과 탭의 화면이다. 경제성 분석 결과 탭은 분석 결과 조회 시, 경제성 분석 탭에 입력한 값들을 토대로 기간에 따른 총비용, 총편익을 표와 그래프로 나타내도록 구성하여 사용자가 직관적으로 분석 결과를 파악할 수 있다. 또한 사용자의 편의를 위해 표 저장, 그림 저장 버튼이 우측 상단에 배치되어 있다.

분석 결과에서 총비용과 총편익은 할인율을 고려하여 현재 가치로 환산한 값이고, 손익분기점은 그래프에서 현재 가치로 환산한 총비용과 총편익이 교차하는 지점으로, BCR 값이 1인 지점을 뜻한다



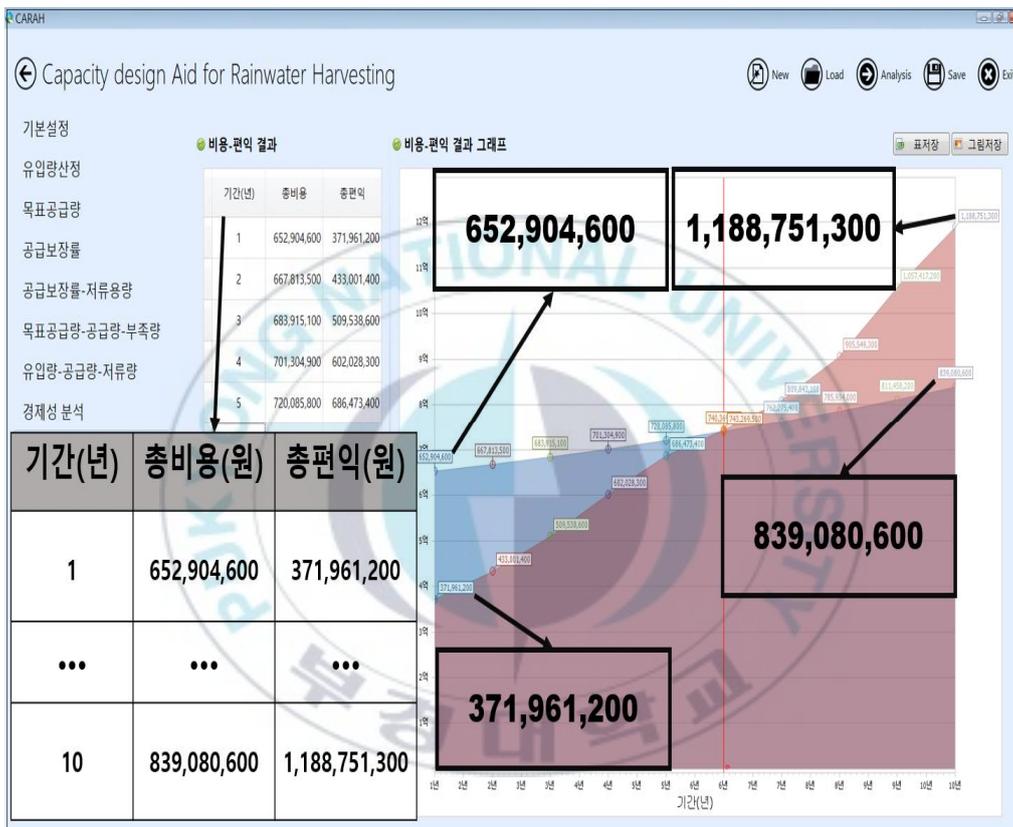


그림 4.10 CARAH의 경제성 분석 출력 화면

## 제5장 빗물이용시설의 용량 설계 및 분석 결과

### 5.1 대상 지역 선정

본 연구의 적절성을 검증하기 위해 Dongbu Engineering (2008)에 기술되어 있는 광고 신도시를 대상 지역으로 선정하였다. Dongbu Engineering (2008)에는 SWMM을 이용한 유역 유출 연속 모의를 통한 빗물저류조 집수구역의 장기적인 유출량 결과와 우수 보장률을 고려한 저류조 용량 산정 결과를 제시하고 있으며, 대상 지역 내 빗물저류조 5호의 저류조 용량 산정 결과를 토대로 본 연구의 결과와 비교하였다. 그림 5.1은 광고 신도시에 계획된 빗물저류조의 위치도이다.

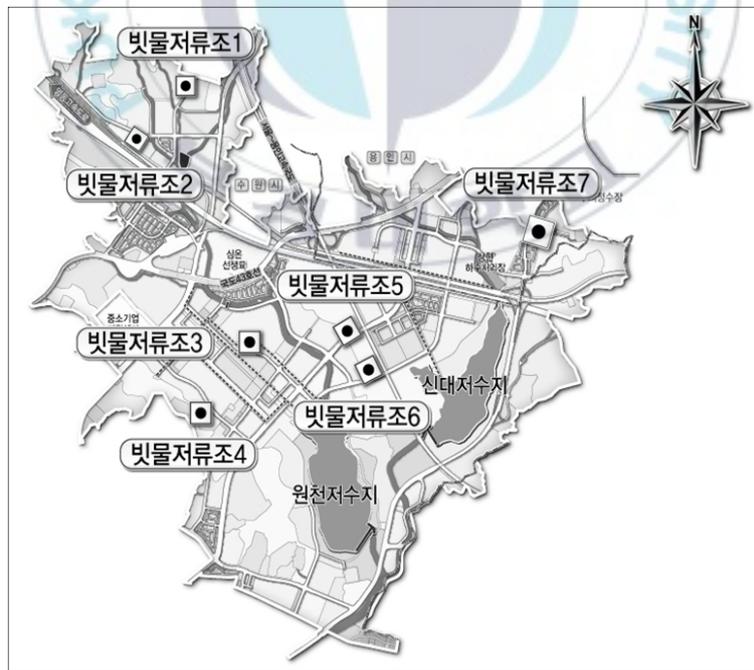


그림 5.1 광고 신도시의 빗물저류조 설치 계획

## 5.2 빗물저류조 용량 설계 및 경제성 분석 결과

### 5.2.1 최적 용량 설계를 위한 입력 자료

Dongbu Engineering (2008)에서는 수원기상대의 1998년부터 2007년까지 과거 10년간 기상관측 자료를 이용하였고, SWMM 장기 유출 모의를 통해 유입량을 산정하였으며, 광고 택지 개발사업 공원계획과 연계하여 조경/소방/청소 등의 용수를 결정하였다. 이러한 자료를 토대로 CARAH의 입력 자료를 구성하였다(그림 5.2).

The screenshot shows the CARAH software input interface. The background features a watermark of the Daegu National University logo. The interface is organized into several sections:

- 기본정보 (Basic Information):**
  - 지점명 (Location Name): 광고신도시 물순환시스템 조성공사-빗물저류조5
  - 모의기간 (Simulation Period): 1998-01-01 ~ 2007-12-31. Below this are buttons for -1 yy, +1 yy, ~1 yy, ~5 yy, and ~10 yy.
- 유입량산정 (Inflow Estimation):**
  - 직접입력 (Direct Input): Selected.
  - 산정 (= 집수면적(m²) x 유출계수 x 강우량(mm) x 1/1,000(m³/mm)) (Calculation):
    - 집수면적(m²) (Catchment Area): 0
    - 유출계수 (Coefficient): 0
- 목표공급량 (Target Supply):**
  - 합계입력 (Total Input): Selected.
  - 개별입력 (엔타키 및 콤마로 여러 항목 입력가능합니다) (Individual Input):
    - 용도목록 (Use Category): 화장실, 도로 청소, 조경
- 공급보장률 구분 (Supply Reliability Classification):**
  - 공급보장률 최대값(%) (Maximum Supply Reliability): 0 (목표공급량 입력 시 자동 계산)
  - 단일선택 (Single Selection):
    - 공급보장률(%) (Supply Reliability): 0
  - 다중선택 (Multiple Selection):
    - 초기값(%) (Initial Value): 10
    - 중분값 (Intermediate Value): 10

그림 5.2 빗물이용시설의 설계 방법 결정

그림 5.3은 1998년부터 2007년까지 수원기상대의 일 단위 강우량 시계열과 Dongbu Engineering (2008)의 빗물저류조 5호에 계획된 빗물이용시설의 유입량을 직접 입력한 화면이다.

그림 5.4는 Dongbu Engineering (2008)에서 빗물저류조 5호에 대하여 계획한 용수 용도별 공급량의 합계를 목표 공급량으로 입력한 화면이다.

그림 5.5는 공급 보장률의 구분을 위해 초깃값과 증분값을 각각 10으로 설정했을 때 화면으로, 입력된 유입량과 목표 공급량을 토대로 계산된 최대 공급 보장률에 따라 공급 보장률이 10%에서 100%까지 구분된다.

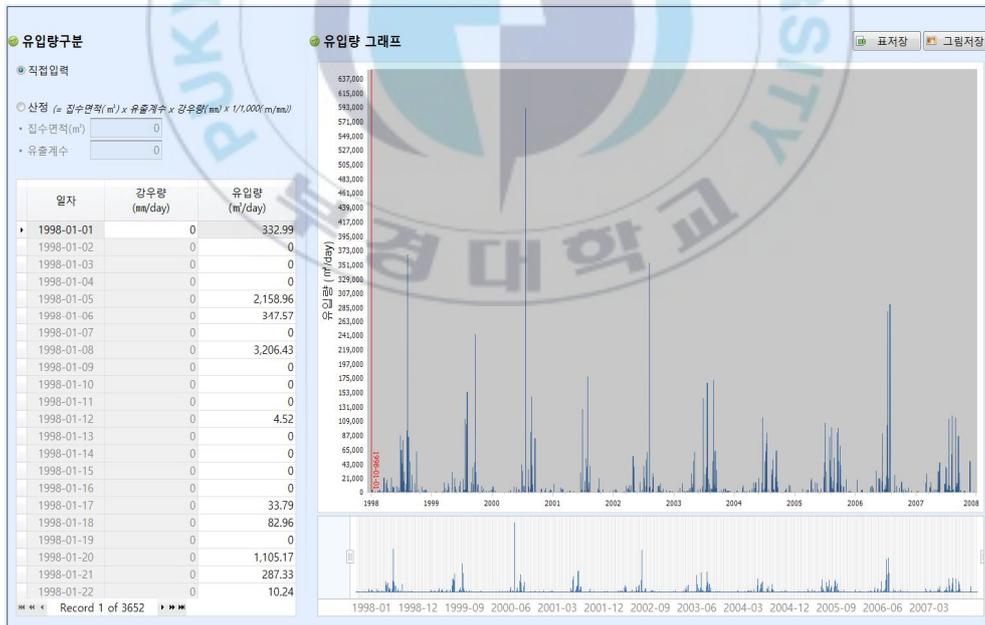


그림 5.3 유입량 입력 화면

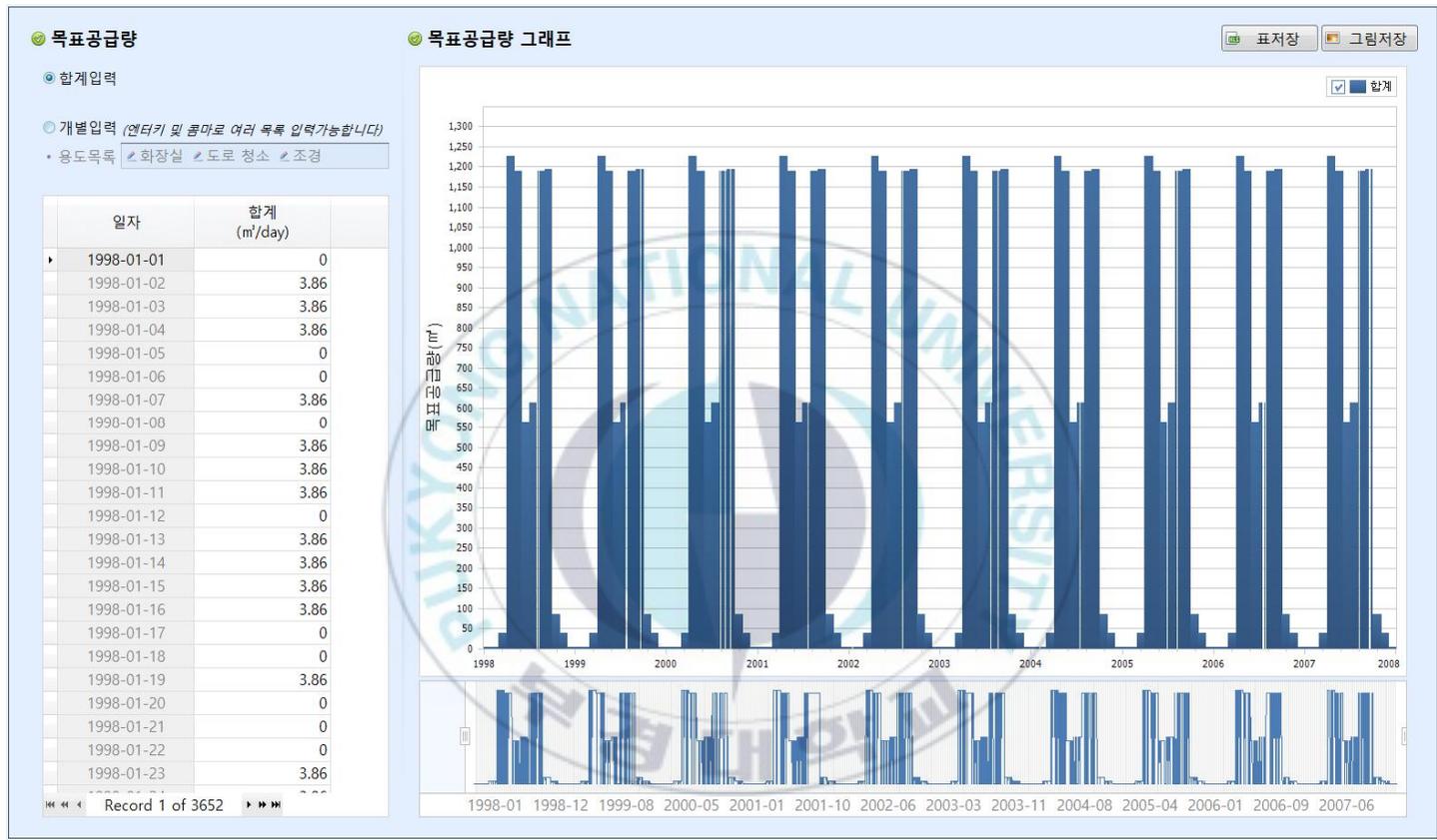


그림 5.4 목표 공급량 입력 화면



그림 5.5 공급 보장률 결정 및 분석 실행 화면

### 5.2.2 최적 용량 설계 결과

표 5.1과 그림 5.6은 입력 자료를 토대로 공급 보장률에 따른 저류 용량을 산정한 결과이다.

표 5.1 공급 보장률별 저류 용량

공급 보장률(%)	저류 용량(m <sup>3</sup> )
30	4
40	20
50	78
60	341
70	1,190
80	3,368
90	9,363

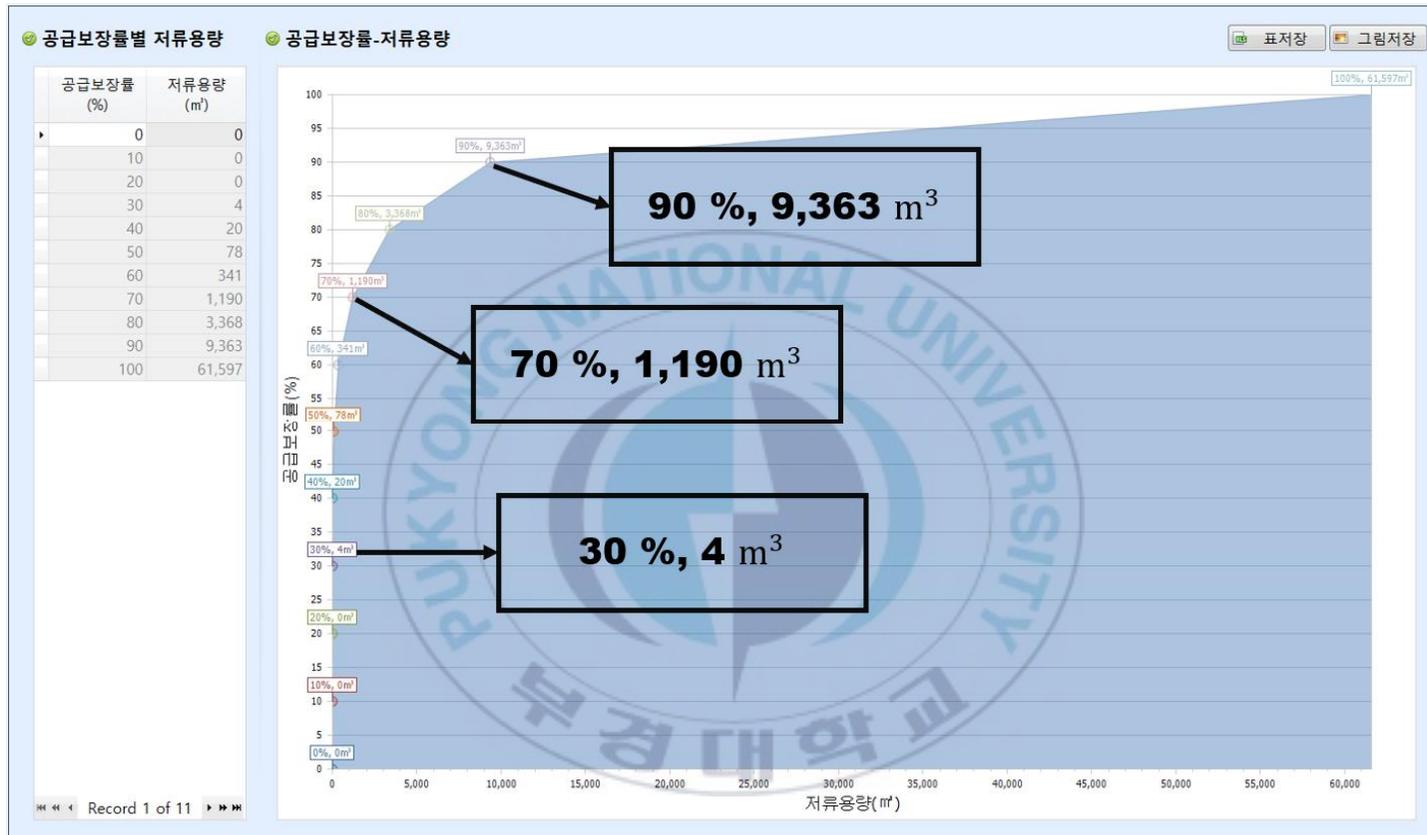


그림 5.6 공급 보장률별 저류 용량

Dongbu Engineering (2008)에서는 빗물저류조 5호의 최적 용량을 우수 이용률 73.11%일 때, 2,700 m<sup>3</sup>로 제시하였다. 표 5.1에서 공급 보장률에 따른 저류 용량의 결과는 공급 보장률이 70%일 때 1,190 m<sup>3</sup>이고, 공급 보장률이 80%일 때, 3,368 m<sup>3</sup>이다. 위의 결과를 통해 Dongbu Engineering (2008)에서 제시한 우수 이용률과 최적 용량이 CARAH를 이용하여 최적 용량을 산정한 결과의 범위 내에 있음을 확인하였다. 또한 단일 공급 보장률에 대한 저류 용량 산정 기능을 이용하여 공급 보장률 78.32%일 때, 2,705 m<sup>3</sup>의 저류 용량이 산정됨을 확인하였다(그림 5.7). 그리고 그림 5.8의 공급 보장률을 10%에서 100%까지 각각 선택하였을 때, 저류 용량이 증대됨에 따라 공급량은 증가하고 부족량은 감소하는 것과 그림 5.9의 공급 보장률을 10%에서 100%까지 각각 선택하였을 때, 저류 용량이 증대됨에 따라 저류량이 증가하는 결과를 통해 분석 결과의 정확성을 검증하였다.

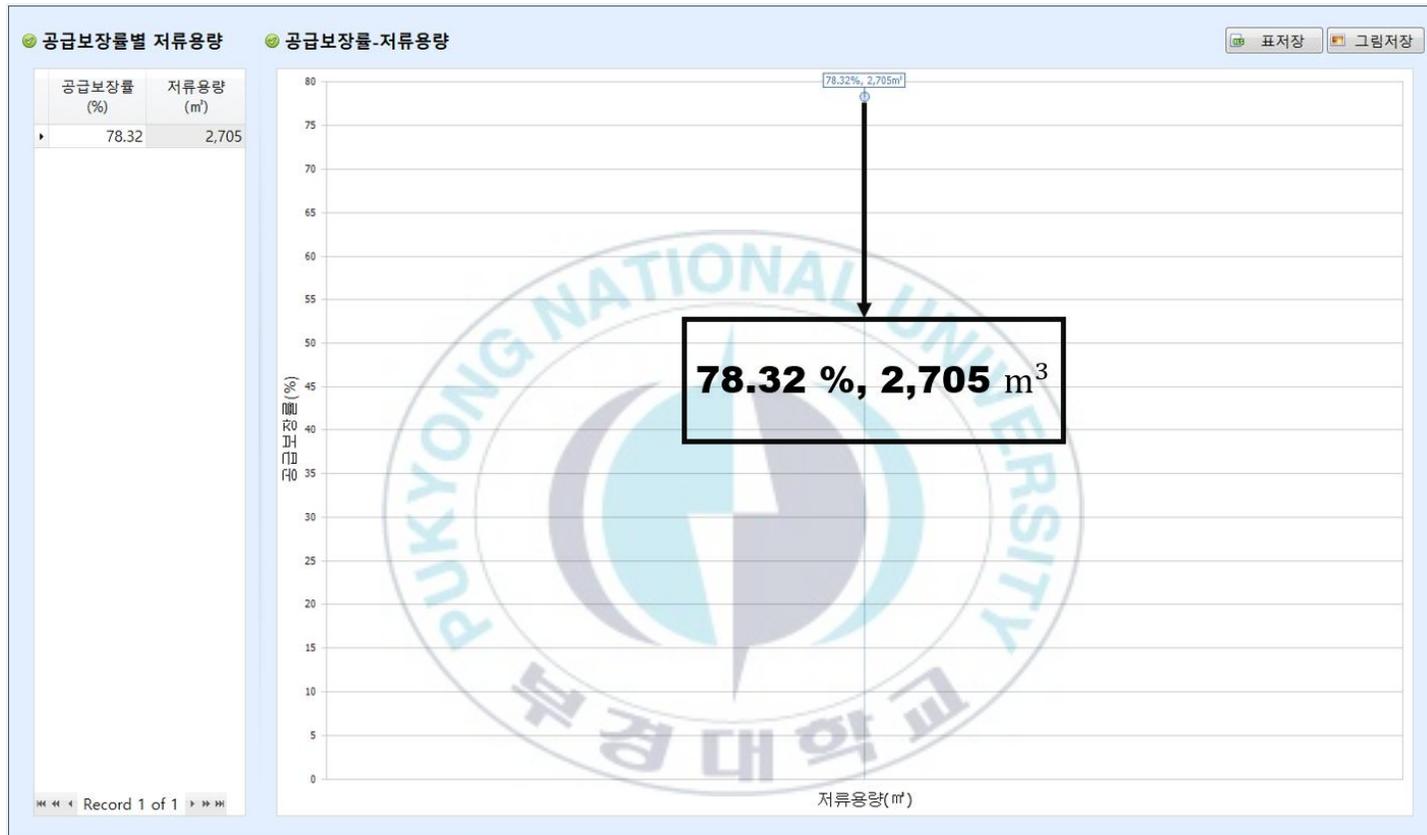


그림 5.7 공급 보장률 78.32%일 때 저류 용량

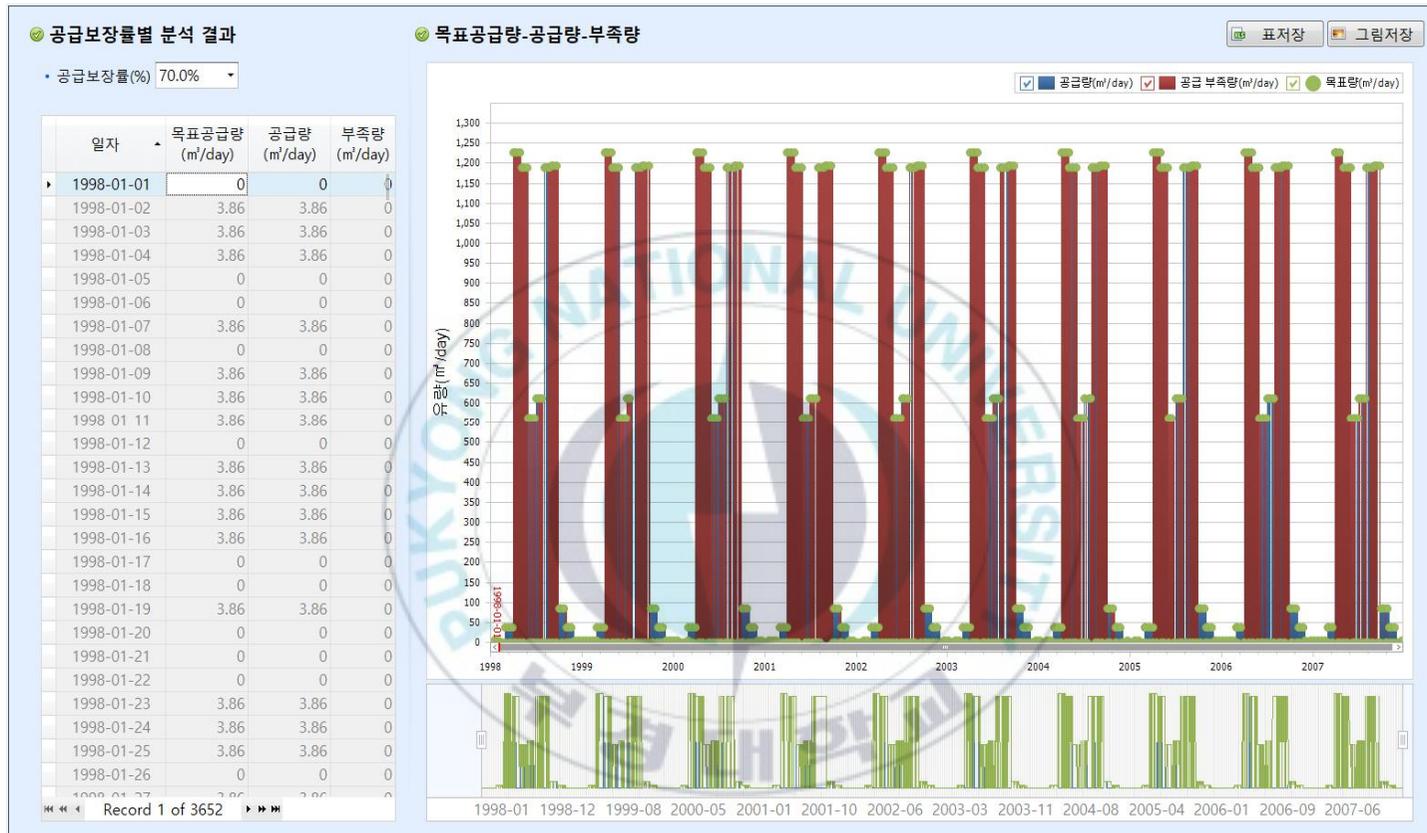


그림 5.8 공급 보장률별 목표 공급량-공급량-부족량



그림 5.9 공급 보장률별 유입량-공급량-저류량

### 5.2.3 경제성 분석을 위한 입력 자료

그림 5.10은 최적 용량 설계를 통해 산정된 저류 용량의 비용-편익 분석을 위해 분석 기간 및 할인율, 비용과 편익에 대한 값들을 입력한 화면이다.

분석 기간은 표 3.1을 참고하여 30년으로 결정하였고, 할인율은 사회적 할인율인 4.5%를 적용하였다.

비용 항목에서 설치비는  $m^3$ 당 550,000원으로 결정하였고, 저류 용량 4  $m^3$ 일 때, 유지관리비는 총 설치비의 2%인 44,000원이다. 유지관리비 상승률은 물가 상승률(2011~2020년의 평균 소비자 물가 상승률 1.48%)과 시간당 최저 임금 상승률(2011~2020년의 평균 상승률 7.07%)을 고려하여 8%로 적용하였다(Evaluation Institute of Regional Public Corporation, 2011).

편익 항목에서는 실제 대상 지역인 수원을 선택하여 편익에 해당하는 비용들이 자동으로 산정되도록 하였다. 설치비 지원금과 상·하수도 감면액과 물이용부담금 감면액, 상수도 대체에 따른 절감액은 표 3.10의 지역별 기준에 따라 산정되었고, 상수도 요금 상승률과 하수도 요금 상승률은 부산시의 상수도와 하수도의 상승률(2016년부터 매년 각각의 수도 요금에 대해 8%, 7% 인상)을 참고하여 적용하였다.

위와 같은 방식으로 각각의 저류 용량에 대한 경제성 분석 결과를 얻었다.

**저류용량 결정**

- 저류용량  (m<sup>3</sup>) - 공급보장률 30%

**분석기간 및 할인율 결정**

- 분석기간  (년) (최소10년이상)
- 할인율  (%) (사회적할인율은 4.5%로 적용하고 있음)

**비용**

- 설치비
  - 직접입력  (원)
  - 자동산정  (원) (저류용량 규모에 따른 회귀식)
- 유지관리비
  - 직접입력  (원/년) • 유지관리비 상승률  (%/년)
  - 자동산정  (원/년) (저류용량 규모에 따른 회귀식)

**편익**

- 단일선택  자동산정  (지역선택)
- 설치비 지원금  (원)
- 상수도 요금 감면액  (원/월) • 상수도요금 상승률  (%/년)
- 하수도 요금 감면액  (원/월) • 하수도요금 상승률  (%/년)
- 물이용 부담금 감면액  (원/월)
- 상수도 대체에 따른 절감액  (원/월)

그림 5.10 경제성 분석을 위한 자료 입력

#### 5.2.4 경제성 분석 결과

그림 5.11은 분석 기간 30년에 대한 저류 용량별 경제성 분석을 결과를 나타낸 것이다. 상세한 결괏값은 표로 나타내었다(표 5.2). 모든 저류 용량의 BCR이 1 이상이었으며, 그중에서도 60% 공급 보장률에 해당하는 저류 용량 341 m<sup>3</sup>의 BCR이 7.278로 가장 경제적임을 확인하였다.

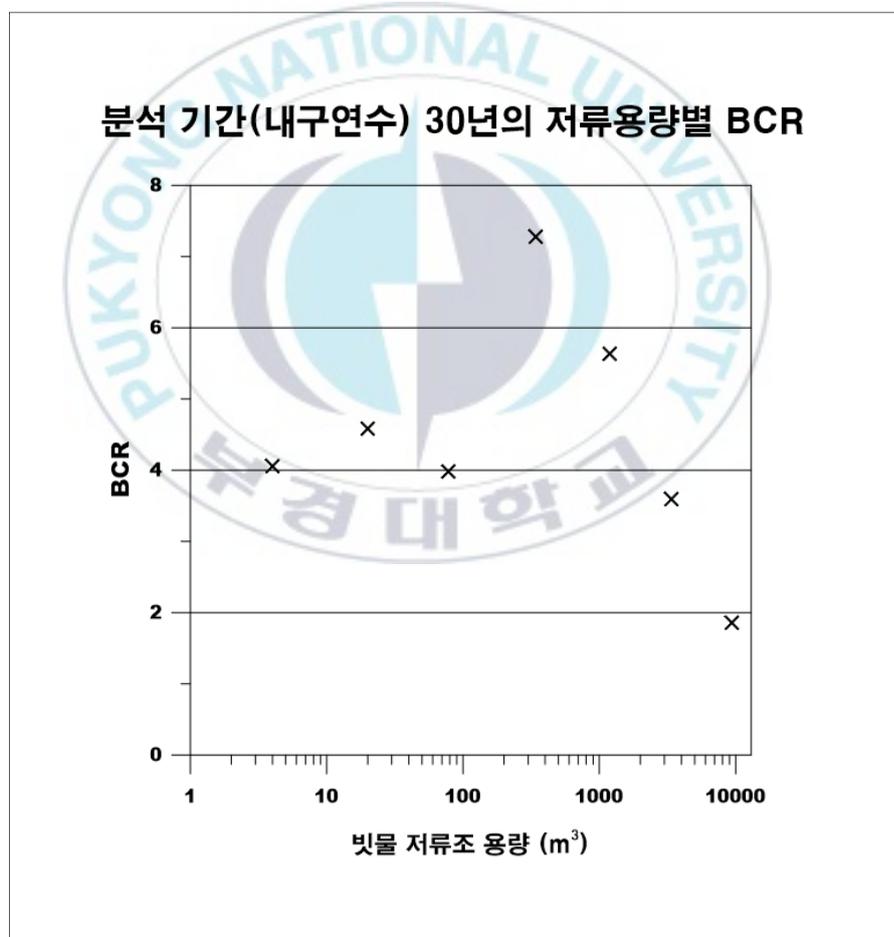


그림 5.11 분석 기간 30년일 때 저류 용량별 BCR

표 5.2 분석 기간 30년일 때 저류 용량별 BCR

저류 용량(m <sup>3</sup> )	BCR
4	4.056
20	4.583
78	3.981
<u>341</u>	<u>7.278</u>
1,190	5.635
3,368	3.593
9,363	1.857

그림 5.12~5.18는 각각의 저류 용량별 BCR이 1이 되는 기간, 즉 비용의 회수 기간을 분석해 본 결과이다. 결과의 가독성을 높이기 위하여 표로 나타내었다(표 5.3). 저류 용량이 가장 작은 4 m<sup>3</sup>일 때, 1년으로 가장 빨랐고(그림 5.12), 이는 설치비 지원금의 효과가 극대화된 결과이다. 이후 저류 용량이 커짐에 따라 비용의 회수 기간이 점점 늘어나다가, 감소한 구간인 저류 용량 341 m<sup>3</sup>와 1,190 m<sup>3</sup>사이에서 회수 기간은 3~5년으로 편익의 효율이 극대화되는 것을 확인하였다(그림 5.15, 그림 5.16). 그리고 저류 용량이 이보다 더 커지면 공급보장률의 증가를 위해 소요되는 비용이 편익보다 커지게 되면서 비용 회수 기간이 재차 급격하게 늘어나게 되는 것을 확인하였다(그림 5.18). 추가적으로, 편익 항목 중 상수도 대체에 따른 절감액이 BCR 값과 비용 회수 기간에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

표 5.3 저류 용량별 비용의 회수 기간

저류 용량(m <sup>3</sup> )	기간(년)
4	1
20	1
78	5~6
341	3~4
1,190	4~5
3,368	7~8
9,363	14~15

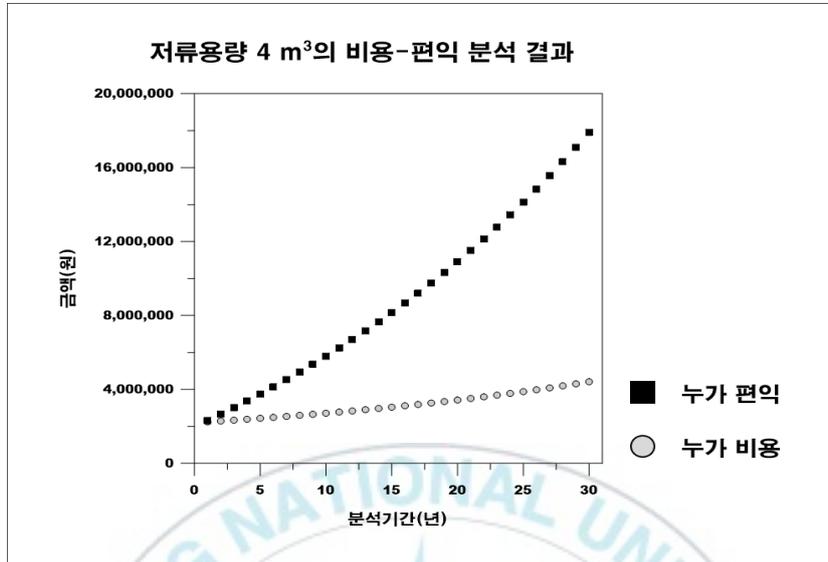


그림 5.12 저류 용량 4 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

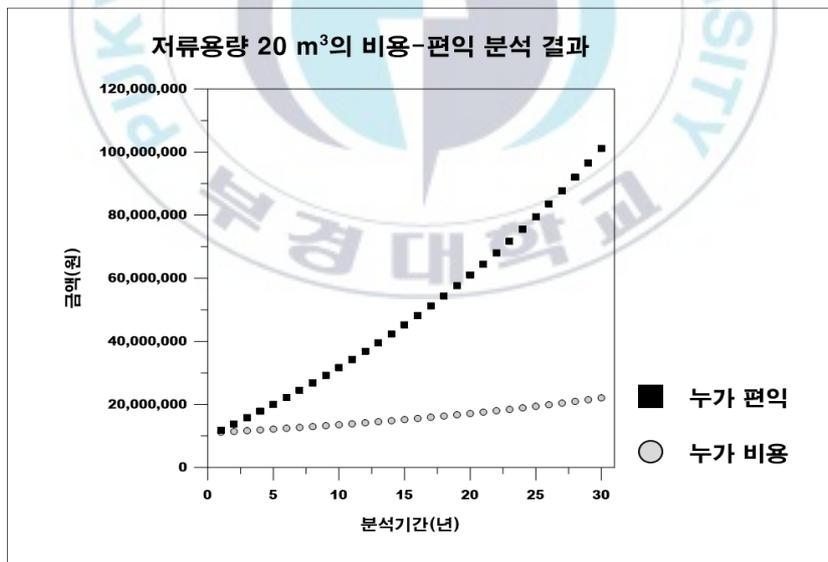


그림 5.13 저류 용량 20 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

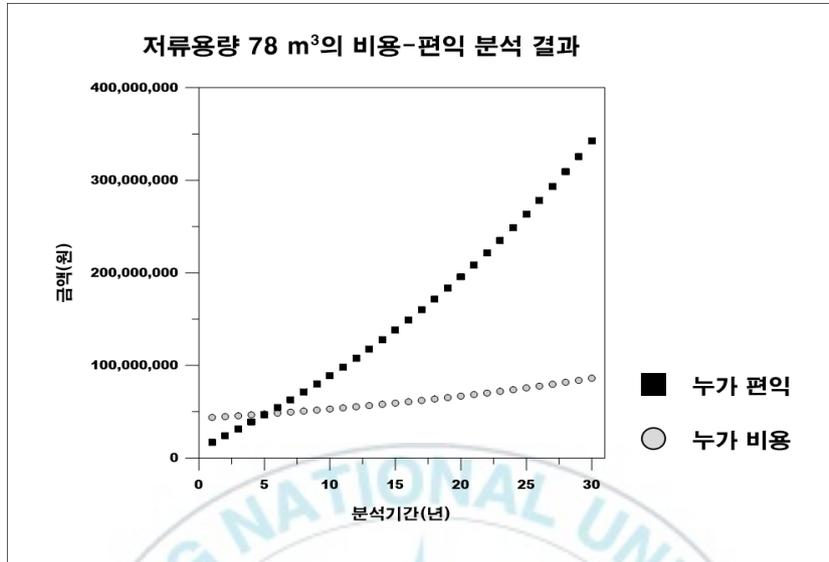


그림 5.14 저류 용량 78 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

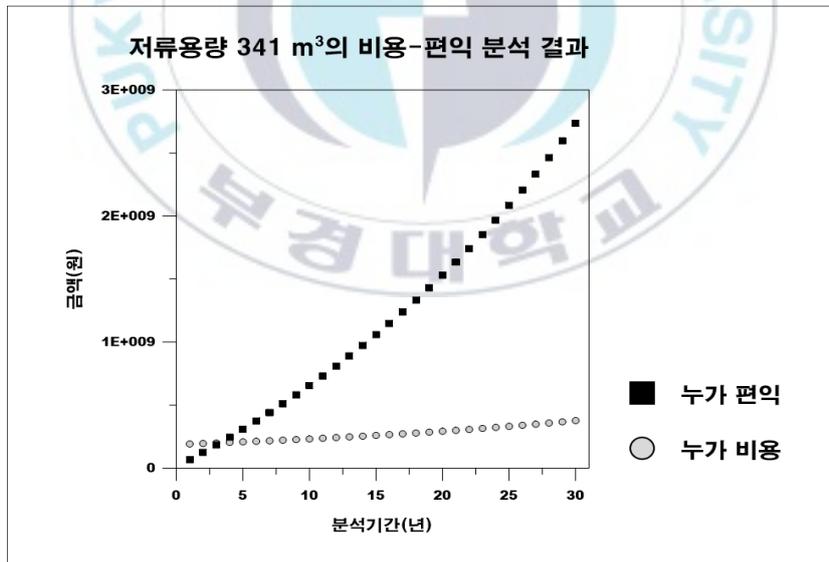


그림 5.15 저류 용량 341 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

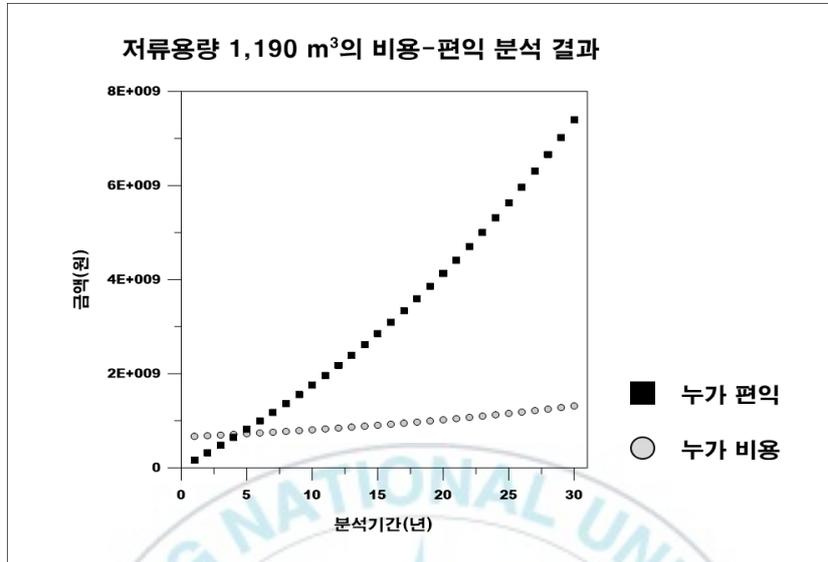


그림 5.16 저류 용량 1,190 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

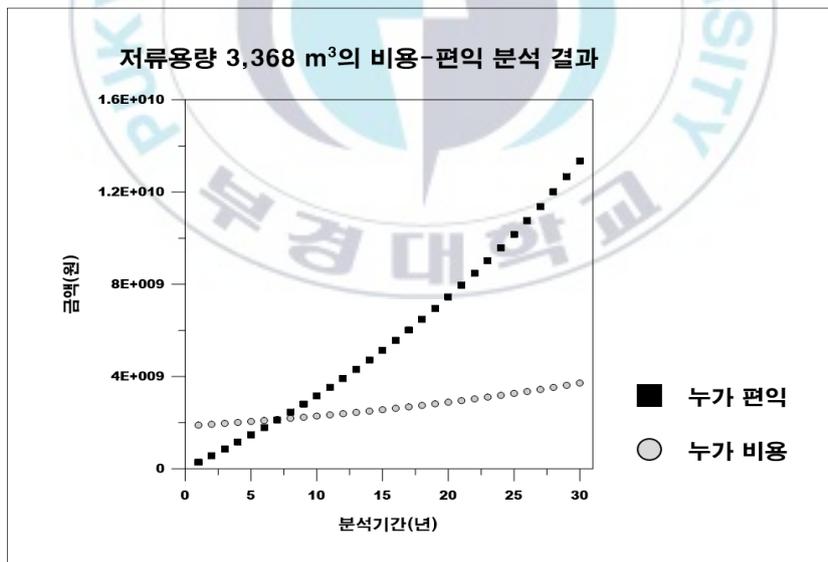


그림 5.17 저류 용량 3,368 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과

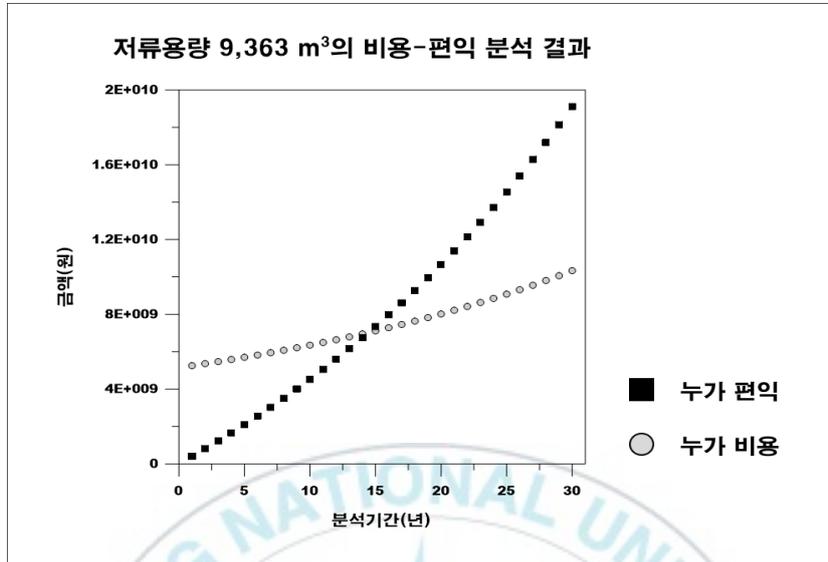
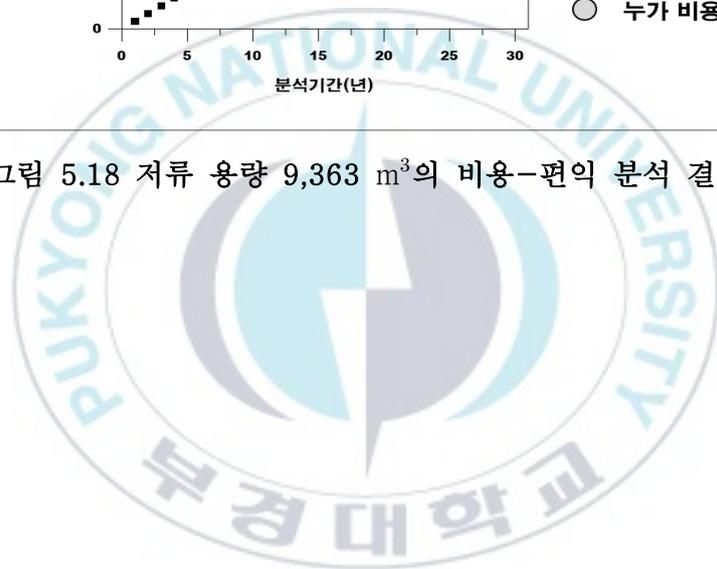


그림 5.18 저류 용량 9,363 m<sup>3</sup>의 비용-편익 분석 결과



## 제6장 결론 및 향후 연구

### 6.1 요약 및 결론

본 연구에서는 다른 연구들과 달리 메타 휴리스틱 기법 중 하나인 입자 군집 최적화 기법과 저수지 질량 보존식, 목표 보장률에 관한 수식을 연계한 최적화 알고리즘과 비용-편익 분석 방법 중 비용편익 비율법을 함께 적용하여 빗물이용시설 설계 프로그램인 CARAH의 사용자 편의 환경을 구현하였고, 이를 통해 짧은 시간 내에 최적 용량을 결정하는 것이 가능하며, 빗물이용시설의 최적 용량 결정과 경제성 분석이 연속적으로 이루어지도록 하였다. 또한, CARAH를 이용한 빗물이용시설의 최적 용량 산정과 분석 기간 30년일 때, 최적 용량별 BCR의 결과 분석을 통해 경제적 효과가 있는 빗물이용시설의 규모는 341 m<sup>3</sup>임을 확인하였다.

본 연구의 핵심인 빗물이용시설의 최적 용량 설계와 경제성 분석의 과정을 요약하면 다음과 같이 정리된다.

먼저, 빗물이용시설의 최적 용량 설계를 위한 필수적인 입력 자료는 해당 빗물이용시설로 유입되는 유입량 시계열, 목표 공급량 시계열, 목표 보장률이고, 입력된 자료는 최적화 알고리즘에 의해 계산되어 목표 보장률을 만족하는 최적 용량을 출력한다.

빗물이용시설의 경제성 분석에 대한 필수적인 입력 자료는 분석 기간, 할인율, 비용, 편익이고, 비용과 편익을 계산하는 수식과 BCR을 계산하는 수식을 통해 최적 용량별 BCR을 출력한다.

위와 같은 방식으로 결정된 최적 용량 결과와 Dongbu

Engineering (2008)에 기술된 우수 이용률 73.11%일 때, 최적 저류 용량이 2700 m<sup>3</sup>인 결과와 공급 보장률 78.32%일 때, 최적 저류 용량 2705 m<sup>3</sup>인 본 연구의 결과를 비교하여 최적화 알고리즘의 정확성을 검증하였고, 비용-편익 분석을 통해 분석 기간 30년일 때, 빗물이용시설의 실질적인 경제적 효과를 확인하고, 목표 보장률별 최적 용량 중에서 가장 경제적인 용량을 341 m<sup>3</sup>로 결정하였다.

## 6.2 향후 연구 과제

본 연구에서는 빗물이용시설의 최적 용량에 대한 경제성을 분석하였다. 그리고 비용-편익 분석을 통해 결정된 최적의 저류 용량은 분석 기간이나 할인율, 비용, 편익을 어떻게 결정하는지에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 이러한 빗물이용시설의 실질적인 운영을 위해서는 경제성이 우선적으로 만족되어야 한다. 따라서 빗물이용시설의 설계 수명 기간 동안 최대의 경제적 편익을 달성할 수 있는 저류 용량의 설계 기술 개발에 대한 연구가 진행된다면 빗물이용시설의 효율적 이용과 활성화에 기여할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- Campisano, A., and Modica, C. (2012). “Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily.” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 63, pp. 9–16.
- Daejeon Metropolitan City (2010). *Basic plan for rainwater management*. pp. 158–161.
- Dongbu Engineering (2008). *Gwanggyo new town water circulation system creation work (design and construction bid) basic design report*. pp. 79–85.
- Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). “A new optimizer using particle swarm theory.” *Proceedings Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, Nagoya, Japan, pp. 39–43.
- Evaluation Institute of Regional Public Corporation (2011). *Local public charge management plan*. pp. 2–50.
- Han, B. (2016). *Design of dimension exchange particle swarm optimization technique with improved convergence performance*. Ph. D. dissertation, Hanyang University.
- Han, M., Han, M., and Kim S. (2004). “A consideration in determining the tank size of rainwater harvesting system in buildings.” *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 18, No. 2, pp. 99–109.
- Jin, Y., Kang, T., Lee, S., and Jeong, T. (2020). “Capacity

- determination for a rainfall harvesting unit using an optimization method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 9, pp. 681–690.
- Kang, H., Lee, B., and Jang W. (2008). “Path planning method using the particle swarm optimization and the Improved dijkstra algorithm.” *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 2, pp. 212–215.
- Kang, T., Koo, Y., and Lee, S. (2015). “A study on design method and effect analysis of rainwater harvesting facility for efficient use.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 353–361.
- Kang, W., Chung, E., Lee, K., and Oh, J. (2010). “Estimation of storage capacity for sustainable rainwater harvesting system with probability distribution.” *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 26, No. 5, pp. 740–746.
- Kim, D., Ham, D., Choi, J., Lee, J., and Lee, J. (2020). “Analysis on cost–benefit of rainwater storage facility through water balance analysis.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 361–367.
- Kim, K., Park, H., Kim, T., and Han, M. (2014). “Evaluation of stored rainwater quality and economic efficiency at yangdo elementary rainwater harvesting system.” *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 36, No. 5, pp. 333–341.
- Korea Institute of Construction Technology (2004). *Development*

*of rainwater storage and utilization technology.*  
TPKO200700008684, Ministry of Science and Technology,  
Korea.

- Le, L.M., Ly, H., Pham, B.T., Le, V.M., Pahn, T.A., Nguyen, D., Tran, X., and Le, T. (2019). “Hybrid artificial intelligence approaches for predicting buckling damage of steel columns under axial compression.” *Materials*, Vol. 12, No. 10, 1670, pp. 1–18.
- Lee, J., and Jeong, Y. (2017). “A study on the rational scale estimation of rainwater harvesting facilities on condominium complex.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 5, pp. 297–303.
- Lee, J., and Kim, S. (2015). *Green energy cooperative study: Estimation of appropriate social discount rate and social cost of carbon in korea.* Korea Energy Economics Institute, pp. 1–11.
- Lee, W., Kim, J., Kang, S., Jeong, H., Moon, H., and Hyun, C. (2012). “Installation criterion for rainwater harvesting facilities of multi-family housings using cost-benefit analysis.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, Vol. 28, No. 10, pp. 121–130.
- Lim, S., Kim, B., Ryoo, K., and Lee, S. (2021). “Determination of optimum capacity rainwater utilizing facilities by analysis of the water supply by land use scenario.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 41, No.

4, pp. 387–397.

Ministry of Environment (2011). Development of technology for design and management of rainwater facility. pp. 216.

Mun, J., Kim, H., Park, J., Lee, J., and Kim, R. (2012). “Evaluation of tank capacity of rainwater harvesting system to secure economic feasibility and sensitivity analysis.” *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 2, pp. 191–199.

Mun, J., and Han, M. (2009). “An economical analysis of the rainwater harvesting(rwh) system at the s residential and commercial complex.” *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning and Design*, Vol. 25, No. 12, pp. 173–181.

Shim, M. (2000). “Introduction to water economics analysis (1).” *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 33, No. 3, pp. 111–120.

Suwon City (2016). *Rainwater harvesting unit installation support plan*. pp. 1.