



## 회복탄력성을 고려한 기상 시나리오별 가뭄 용수 공급방안: 나주호를 중심으로

### Water Supply Alternatives for Drought by Weather Scenarios Considering Resilience: Focusing on Naju Reservoir

박진현<sup>a</sup> · 고재한<sup>b</sup> · 조영준<sup>c</sup> · 정경훈<sup>d</sup> · 성무홍<sup>e</sup> · 정형모<sup>f</sup> · 박현규<sup>g</sup> · 유승환<sup>h</sup> · 윤광식<sup>†</sup>  
Park, JinHyun · Go, Jeahan · Jo, YoungJun · Jung, KyungHun · Sung, MuHong · Jung, HyoungMo ·  
Park, HyunKyu · Yoo, SeungHwan · Yoon, KwangSik

#### Abstract

Resilience has been widely used in various fields including design and operation of infrastructures. The resilient infrastructures not only reduce the damage scale of various disasters but also reduce the time and cost required for restoration. However, resilience rarely applied to promote efficient management of agricultural infrastructures. Recently, drought is an aggravating disaster by climate change and need countermeasures. Therefore, we tried to demonstrate evaluating measures in case of drought under consideration of resilience. This study applied the robustness-cost index (RCI) to evaluate alternative solution of the supply problem of a large agricultural reservoir under drought conditions. Four structural alternatives were selected to estimate the robustness index (RI) and the cost index (CI) to obtain the RCI values. Structural alternatives are classified into temporary measures and permanent measures. Temporary measures include the development of a tube wells and the installation of the portable pump, while the permanent measures include the installation of a pumping stations and the pumping water to the reservoir (Yeongsan River-Naju reservoir). RCI values were higher in permanent measures than those of temporary measures. Initial storage of the reservoir also affected RCI values of the drought measures. Permanent measures installation and management of early stage of the reservoir storage shortage was identified as the most resilient system.

Keywords: Drought; reservoir; resilience; robustness-cost index; structural alternative

## 1. 서 론

회복탄력성 (resilience)은 시스템이 내·외부의 간섭에 의

해 본래의 기능을 상실하였을 경우, 정상상태로 되돌아가는 능력으로 설명될 수 있다 (Holling, 1973; Vugrin et al., 2010). 회복탄력성은 사회생태학, 의학, 심리학 및 방재학 등 다양한 연구 분야에서 목적에 따라 다양하게 정의되어 활용되어 왔으며, 각각의 연구자들은 회복탄력성을 견고함 (robustness), 다중성 (redundancy), 자원효율성 (resourcefulness) 및 신속성 (rapidity)의 4가지 속성을 활용하여 개념화하였다 (Garnezy, 1985; Rutter, 1987; Folke, 2006; Shin et al., 2009, Bruneau et al., 2003). 시스템의 회복탄력성은 위험과 관련된 간섭의 노출, 간섭의 노출 이전의 시스템 구성, 간섭으로 인한 시스템의 변화, 그리고 각 부분들의 적응능력에 의존한다고 정의하였다 (Gallopín, 2006).

특히 기반시설의 회복탄력성에 대해 NIAC(2009)는 재해의 크기와 지속시간을 줄이는 능력으로 정의하고, 회복탄력적인 기반시설의 효과는 잠재적 재해에 대한 예상능력, 충격 흡수 능력, 적응력 및 빠른 회복력에 의존하며, 회복탄력성이 확보된 사회기반시설은 각종 재해의 피해의 규모를 경감시킬 뿐만 아니라 복구에 소요되는 시간을 줄여 사회적 손실을 최소화 한다 (Vugrin and Camphouse, 2011). Yu et al. (2012)는 재해에 따른 피해비용과 복구비용의 합을 회복탄력성 비용이라 정의하고 일정규모 이상의 재해가 발생하여 지역사회에

<sup>a</sup> Director, Project Planning Office, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>b</sup> Deputy Director, Farmland & Irrigation Development Office, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>c</sup> Deputy Director, Chungnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>d</sup> Director, Project Planning Office, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>e</sup> Manager, Jeonnam Regional Headquarter, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>f</sup> Manager, Water Resources Planning Office, Korea Rural Community Corporation (KRC)

<sup>g</sup> MS Student, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

<sup>h</sup> Assistant Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

<sup>†</sup> Professor, Department of Rural and Bio-Systems Engineering, Chonnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-62-530-2158, +82-10-3081-5320

E-mail: ksyoon@chonnam.ac.kr

Received: March 30, 2018

Revised: August 24, 2018

Accepted: August 29, 2018

입힌 피해를 비용으로 환산한 것이 피해 비용이며, 발생한 피해를 회복시키기 위해 소요되는 비용이 복구비용이라고 정의하였다. 특히 재해 분야에서의 회복탄력성은 시스템 기능이 유지되기 위해 필요한 내구성과 생산성, 운영능력이 회복되기 위해 필요한 시간의 차원으로 대표되므로, 계획범위 이내의 재해에 의한 피해를 저감시키기 위한 구조적 대안(structural alternatives)의 내구성(robustness) 확보와 예측 불가능한 규모의 재해에 대한 복구 신속성(rapidity) 확보를 위한 적절한 비구조적 대안(nonstructural alternatives)의 수립이 중요하다 (Kim et al., 2011; Woo, 2011; Lee et al., 2014).

이러한 회복탄력성의 개념은 다양한 분야에서 활용되어 왔으나, 농업생산기반시설 분야에서의 활용이 미미할 실정이다. 최근 잦은 가뭄 등 이상기후로 농업용수 공급에 차질이 발생하고 있으며, 농업용수를 관리하는 주체들은 자연재해(가뭄)를 대비하여 다양한 구조적 대안을 시행하고 있으나, 구조적 대안에 대한 평가 없이 관례적으로 대안을 반복하고 있어 본 연구에서는 가뭄 극복에 대해 회복탄력적인 대안 평가 방법을 제안하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

Lee et al. (2016)은 도시 홍수 사례인 강남역 인근 상습 침수구역을 중심으로 기존 시설과 후보 대안시설(구조적 대안)의 내구성을 평가하였으며, 그 기준으로 내구성 지수(robustnessindex, RI), 비용지수(cost index, CI) 및 내구성-비용지수(robustness-cost index, RCI)를 제시하였다. 이를 이용하여 재해의 규모(강우강도)에 따른 각 구조적 대안의 도시 홍수 저감 능력을 평가함으로써 회복탄력적인 사회기반시설 구축 및 나아가 회복탄력적 도시(resilient city) 건설을 위한 기초연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Lee et al. (2016)이 제시한 내구성-비용지수(RCI)를 활용하여 회복탄력성을 평가하였다. 연구는 Fig. 1과 같이 대상저수지를 선정 후 강우시나리오별, 제안된 구조적 대안별 내구성지수(RI), 비용지수(CI) 산정을 통해 내구성-비용 지수(RCI)를 도출하고 각 구조적 대안에 대해 회복탄력성을 평가하였다.

분석절차로는 선정된 저수지를 토대로 기초데이터(저수량, 초기저수율, 연평균강수량)와 가뭄 기상시나리오(연평균

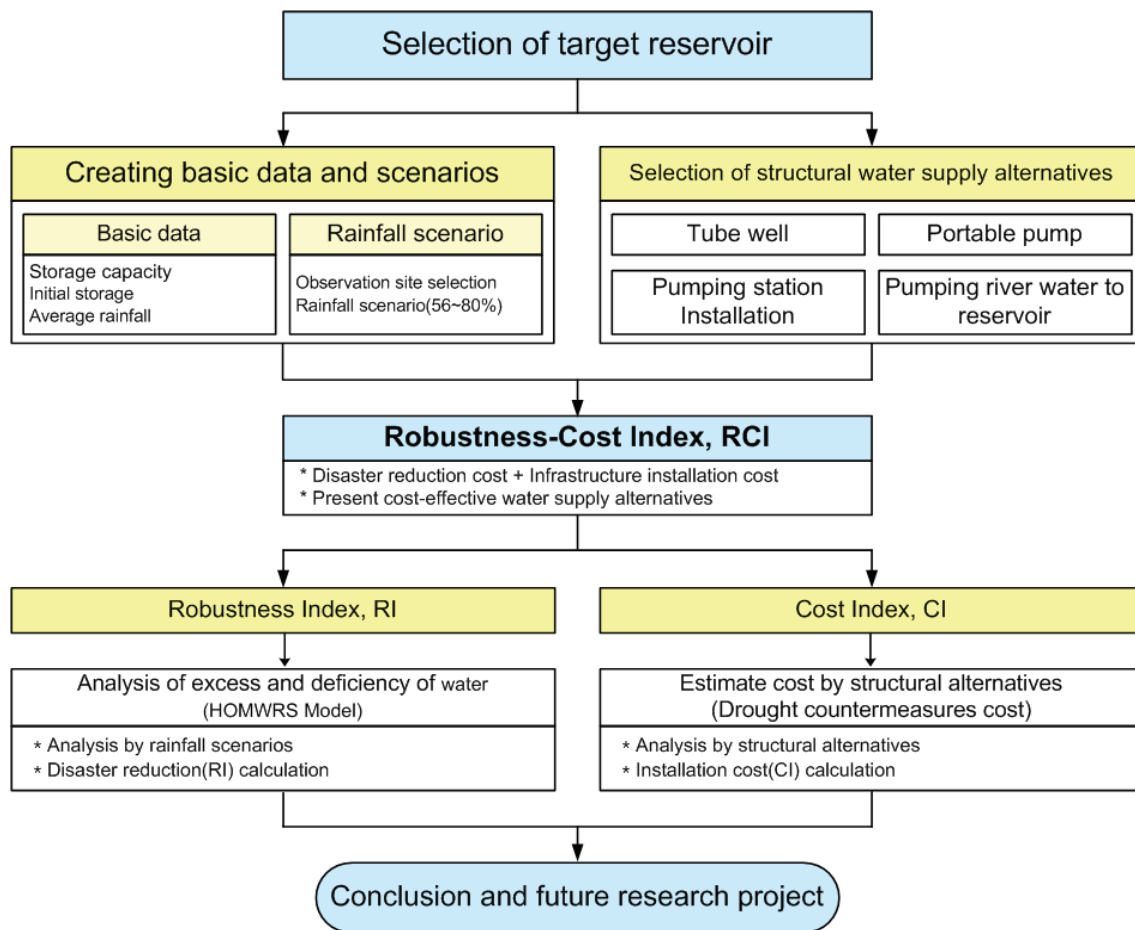


Fig. 1 Procedures of evaluation of resilient agricultural water supply alternatives for drought scenarios

**Table 1** Main specification of four agricultural reservoirs in Yeongsan-river basin

Reservoir	Total storage capacity (×1,000 m³)	Available storage capacity (×1,000 m³)	Basin area (ha)	Full-water area (ha)	Benefit area (ha)
Naju	107,810	106,540	10,470	780	9,054
Jangsung	103,883	99,707	12,280	750	11,139
Gwangju	17,360	15,200	4,130	186	3,155
Damyang	77,608	76,670	6,560	441	6,245

강수량의 56~80 %)를 가정하고, 수자원 공급대안 (임시대책으로 관정개발 또는 양수기 설치, 항구대책으로 양수장 신설 또는 영산강-나주호 수계연결)을 설정하였다. 각 시나리오별 수자원공급 대안별 내구성지수, 비용지수를 구하여 최종적으로 내구성-비용지수 (RCI)가 도출되면 각 대안별 회복탄력성에 따른 수자원 공급방안의 효율성을 평가하였다.

### 1. 대상저수지

여러 가지 자연재해 중 가뭄은 그 특성상 홍수 등 기타 자연재해와는 달리 진행속도가 느리므로 시간적·공간적으로 정확하게 판단하기 쉽지 않다. 또한, 기후 변화에 의한 가뭄과 함께 산업화와 도시화에 따른 물 수요도 급증하고 있어 사용 가능한 물의 양은 점점 줄어드는 상황을 맞고 있다. 영산강 수계에서는 대단위농업개발 I 단계 사업으로 영산강 상류에 장성, 담양, 나주, 광주호를 건설하여 34,500ha의 농경지에 용수공급 할 수 있게 되었으나, 2,000년대 이후 잦은 가뭄 등 이상기후로 농업용수 공급에 차질이 발생하고 있다. Table 1은 영산강 상류 대규모 농업용저수지 제원을 보여주고 있으며, 본 연구에서는 4대호 중 총저수량이 가장 많고, 유역면적이 비교적 작아 매년 저수량 확보에 곤란을 겪는 나주호를 대상저수지로 선정하였다.

### 2. 평가 방법 및 분석 시나리오 설정

#### 가. 내구성 지수와 비용 지수

본 연구에서는 나주호의 강수량 시나리오별 구조적 대안에 대한 내구성평가를 위해 Lee et al. (2016)이 제안한 내구성-비용 지수를 도입하여 현 기반시설과 구조적 대안들의 회복탄력성을 평가하였다. 따라서 내구성 지수 (RI)와 비용지수 (CI)는 식 (1), 식 (2)와 같이 정의하였고, 내구성지수와 비용지수를 곱하여 내구성-비용지수 (RCI) 값을 얻었다.

$$RI = \frac{CA + \sum AA}{DS(1 - \frac{AE}{100})} \quad (1)$$

$$CI = \frac{1}{1 + \frac{AC}{CC}} \quad (2)$$

$$RCI = RI \times CI \quad (3)$$

여기서, CA는 현시설의 용량, AA는 구조적 대안의 용량, DS는 재해규모 (물부족량), AE는 재해규모 저감비율로서 추가용량 확보에 따른 재해규모 저감에 따라 구조적 대안에 대한 내구성을 평가하였다. 또한 비용지수에서 AC는 구조적 대안의 비용, CC는 현재 기반시설의 비용으로서 현재 기반시설을 설치하는데 소요된 비용 대비 추가적인 비용지출에 따라 비용지수를 산정하였다.

추가적으로 초기저수율이 내구성 지수에 미치는 영향을 분석하기 위해 시나리오별 초기저수율을 설정하였으며, 초기저수율을 용수부족 (가뭄)상황의 일반화를 위하여 「농업가뭄」 위기대응 실무매뉴얼의 가뭄상황 판단기준의 가뭄대책이 수립되기 시작하는 평년대비 저수율 70 %이하를 기준으로 구조적 대안에 대한 시나리오를 설정하였다. 여기서 초기저수율은 70 % (주의단계 발령), 60 % (경계단계 발령), 50 % (심각단계 발령) 및 25 % (나주호의 분석시점 저수율)로 초기저수율을 설정하여 내구성-비용 (RCI)지수의 변화 양상도 동시에 분석하였다.

#### 나. 가뭄시나리오에 따른 저수지 물 부족량 산정

##### 1) 가뭄 시나리오

최근 연속된 강수량 부족으로 분석시점 (2017년 12월말) 기준으로 영산강유역 내 저수지의 평균 저수율은 52.5 %로 평년대비 70 % 수준에 불과하였으며 나주지역은 평년대비 51.7 %의 저수율을 기록하였다. 특히 전남서남해안의 주요 농업용수 공급원인 나주호는 저수율이 25.4 % (27백만 m³)로 평년대비 42 %에 불과하였다.

따라서 본 연구에서는 가뭄 시나리오를 강수량이 평년대비 가장 낮았던 1995년 (56 %), 1968년 (61 %), 1977년 (68 %), 1992년 (80 %)에 해당하는 연도의 필요수량, 공급가능량 및

Table 2 HOMWRS input data

Division	Naju reservoir	Remarks
Benefit area	9,054 ha	
Basin area	Total : 10,470 ha Direct basin : 8,460ha, Indirect basin : 2,010 ha	Indirect basin : Gumjungbo
Meteorological station	Gwangju	
Rainfall data	1967~2016 (50years)	
Infiltration rate	3.4 mm/day	
Waterway loss	15 %	
Basin inflow estimated factor	1 <sup>st</sup> basin : 2,900 ha, 2 <sup>nd</sup> basin : 2,900 ha, 3 <sup>rd</sup> basin : 1,881ha Subtotal : 7,681ha (Except full water area) Indirect basin : 2,010ha (Maximum 7 m <sup>3</sup> /s inflow)	Full water area: 779ha
Landuse of watershed	Rice field 11,3 %, Upland 3,8 %, Forest 78,3 %	
Lower stream flow	34,000 m <sup>3</sup> /day	
Ponding depth	Maximum : 60mm, Minimum 0mm	

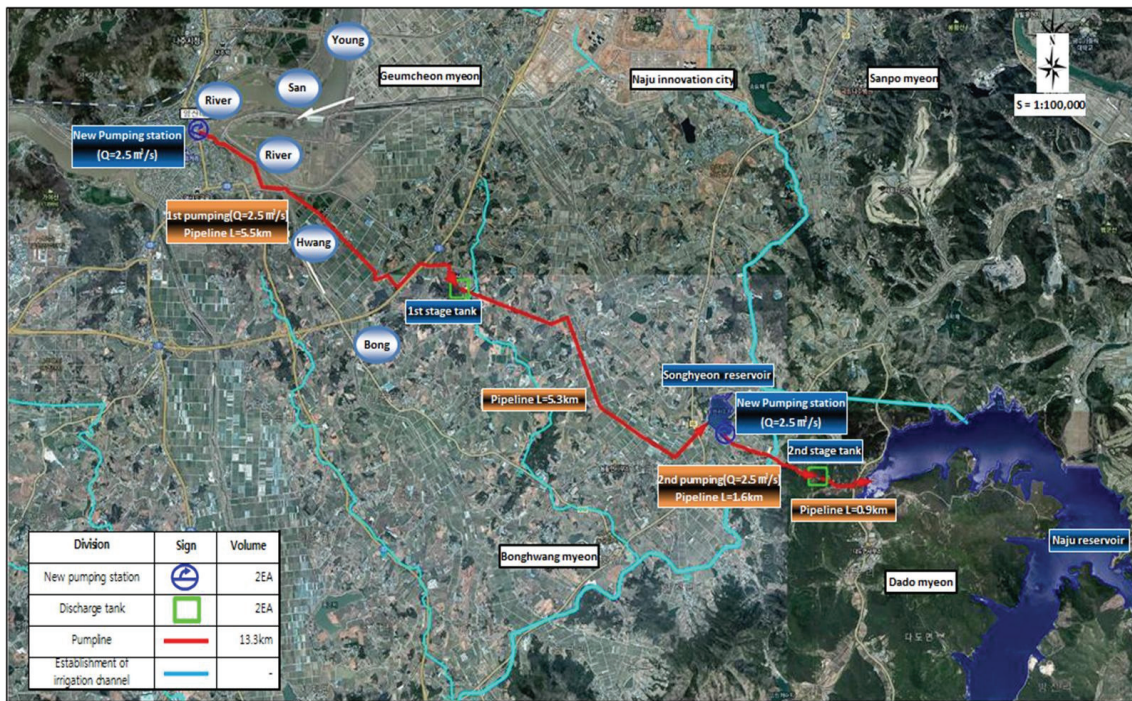


Fig. 2 Naju reservoir, irrigation main, and planned pumping stations which deliver Yeongsan river water to the reservoir

과부족량을 산정하여 각 가뭄 시나리오별 물수지 분석을 실시하였으며, 분석은 농업용저수지의 물수지 분석이 가능한 수리시설물 모의조작시스템 (Hydrological Operation Model for Water Resources System, HOMWRS)을 이용하였다 (Table 2). 물수지 분석에서 유입량은 나주호의 유역특성을 감안하여 산출하였으며, 분석 자료를 통해 산출된 필요수량과 공급가능수량으로 물 부족량을 산출하였다. 이를 토대로 초기 저수율별 임시대책 (관정개발, 양수기 설치)과 항구대책 (말단 물

부족지역 양수장 신설, 영산강-나주호 연계 양수저류)으로 나누어 비교하여 대안을 평가하였다. Fig. 2는 나주호와 관개수로 간선 및 영산강 양수저류를 위한 양수장 계획 지점을 보여주고 있다.

2) 강수량 시나리오별 물부족량 산출

강수량 자료는 기상청의 강수량 자료를 이용하였으며, 시나리오별 강수량은 평년 대비56 % (1995년), 61 % (1968년), 68 %

**Table 3** Water deficiency determined by HOMWRS model according to drought scenarios and initial storage

(Unit: ×1,000 m<sup>3</sup>)

		Drought scenarios (compared to normal year)			
		80 %	68 %	61 %	56 %
Required amount of water		91,671	95,597	100,385	101,880
Available quantity		68,334	58,444	53,535	49,784
Deficiency according to initial storage	70 %	10,147	23,964	33,661	38,906
	60 %	16,742	30,559	40,255	45,501
	50 %	23,337	37,153	46,850	52,096
	25 %	39,824	53,641	63,337	68,583

(1977년), 80 % (1992년)의 데이터를 활용하였다. 활용된 연도의 강수량 자료를 토대로 각 시나리오별 물 부족량은 Table 3과 같이 산출되었다.

나주호의 평균 저수율은 61.9 %로 평년저수량은 65,948 천 m<sup>3</sup>임을 감안할 때, 평년대비 70 % 초기저수율의 저수량은 46,164 천m<sup>3</sup>, 60 %는 39,569 천m<sup>3</sup>, 50 %는 32,974 천m<sup>3</sup>, 25 %는 16,487 천m<sup>3</sup>의 초기 농업용수량이 고려되었다. 물 부족량은 가뭄 심각단계인 저수율 50 %가 기준이며, 시나리오별 최소부족량인 80 % 강우시나리오 및 초기저수율 70 %에서 10,147 천m<sup>3</sup>의 용수가 부족한 것으로 나타났고, 시나리오별 최대부족량인 56 % 강우시나리오 및 초기저수율 25 %에서는 68,583 천m<sup>3</sup>의 용수가 부족한 것으로 산출되었다.

**다. 구조적 대안별 시설계획 및 비용**

1) 나주호 현재 기반시설의 비용

나주호는 1974년 4월 착공하여 1976년 9월 완공된 저수지로 2013년 저수지 둑 높이기 사업을 통하여 현재의 재원이 확정되었다 (Statistical yearbook, 2017). 1976년 9월 완공 당시 2,937백만원의 국고가 투입되었으며, 2013년 저수지 둑 높이기 사업으로 595억원의 국고를 투입하였다. 기반시설비용의 투입시기와 현 시점 구조적 대안의 시간가치를 보정하기 위하여 한국은행 통계시스템 (Economic Statistics System, <http://ecos.bok.or.kr>) 시장금리 (회사채 [장외]3년, AA-등급)를

활용하여 시간가치를 보정하였으며, 자료가 누락된 1979~1986년까지는 1987년의 금리를 동일하게 적용하여 2017년 12월 기준으로 현재기반시설비용을 추정 (1,621 억원)하였다.

2) 구조적 대안별 단위당 공급량 및 비용

구조적 대안은 임시대책과 항구대책으로 구분하였으며, 임시대책은 관정개발, 양수기 설치로 구분하고 항구대책은 말단 물부족지역 양수장 신설, 영산강-나주호 연계 양수저류로 나누어 비교하였다. 강수시나리오별 물 부족량을 해소할 수 있는 규모로 시설계획을 하였으며, 해당계획에 따라 비용을 산정하였다. 임시대책에 대한 비용은 농림축산식품부에서 발간하는 한해대책단가표에 제시된 단가를 적용하였으며, 제시되지 않은 단가는 표준품셈 및 물가정보자료를 활용하였다. 항구대책에 따라 설치하는 양수장설치, 영산강-나주호 연계 양수저류는 유사 설치사례를 통해 사업비를 산정하였다. 설치비를 제외한 유지관리비는 시설별 유지관리가 상이한 시설들을 비교적 균일하게 비교 평가할 수 있는 전기료만 산정하였다.

**3. 분석 시나리오별 추가 용수공급량 및 설치·운영 비용 산정**

구조적 대안은 분석 시나리오 (연평균 강수량의 80 %, 68 %, 61 %, 56 %)를 통해 얻은 물 부족량을 해소할 수 있도록 시설규모를 결정하였으며, Table 5는 구조적 대안별 (관정개

**Table 4** Water supply and total cost per unit of structural alternatives

Structural alternatives		Water supply per unit (×1000 m <sup>3</sup> )	Total cost per unit (million₩)	Installation cost (million₩)	Operating cost (million₩)	Remarks
Temporary measures	Tube well	3	55	50	5	Operating cost (electricity fee)
	Portable pump	30	245	240	5	
Permanent measures	Pumping station	3,000	2,030	2,000	30	
	Pumping river water to reservoir	7,500	9,050	9,000	50	

**Table 5** Total water supply, total cost of structural alternatives under different drought scenarios and initial storage conditions

(Unit: ×1000 m<sup>3</sup>, million₩)

Initial storage rate	Structural alternatives	Water supply (×1000 m <sup>3</sup> ) by rainfall scenarios				Cost (million₩) by rainfall scenarios			
		80 %	68 %	61 %	56 %	80 %	68 %	61 %	56 %
70 %	Tube well	10,149 (3,383)	23,964 (7,988)	33,663 (11,221)	38,907 (12,969)	186,065	439,340	617,155	713,295
	Portable pump	10,170 (339)	23,970 (799)	33,690 (1,123)	38,910 (1,297)	83,055	195,755	275,135	317,765
	Pumping station	12,000 (4)	24,000 (8)	36,000 (12)	39,000 (13)	8,120	16,240	24,360	26,390
	Pumping river water to reservoir	15,000 (2)	30,000 (4)	37,500 (5)	45,000 (6)	18,100	36,200	45,250	54,300
60 %	Tube well	16,743 (5,581)	30,561 (10,187)	40,257 (13,419)	45,504 (15,168)	306,955	560,285	738,045	834,240
	Portable pump	16,770 (559)	30,570 (1,019)	40,260 (1,342)	45,510 (1,517)	136,955	249,655	328,790	371,665
	Pumping station	18,000 (6)	33,000 (11)	42,000 (14)	48,000 (16)	12,180	22,330	28,420	32,480
	Pumping river water to reservoir	22,500 (3)	37,500 (5)	45,000 (6)	52,500 (7)	27,150	45,250	54,300	63,350
50 %	Tube well	23,337 (7,779)	37,155 (12,385)	46,851 (15,617)	52,098 (17,366)	427,845	681,175	858,935	955,130
	Portable pump	23,340 (778)	37,170 (1,239)	46,860 (1,562)	52,110 (1,737)	190,610	303,555	382,690	425,565
	Pumping station	24,000 (8)	39,000 (13)	48,000 (16)	54,000 (18)	16,240	26,390	32,480	36,540
	Pumping river water to reservoir	30,000 (4)	37,500 (5)	52,500 (7)	52,500 (7)	36,200	45,250	63,350	63,350
25 %	Tube well	39,825 (13,275)	53,643 (17,881)	63,339 (21,113)	68,586 (22,862)	730,125	983,455	1,161,215	1,257,410
	Portable pump	39,840 (1,328)	53,670 (1,789)	63,360 (2,112)	68,610 (2,287)	325,360	438,305	517,440	560,315
	Pumping station	42,000 (14)	54,000 (18)	66,000 (22)	69,000 (23)	28,420	36,540	44,660	46,690
	Pumping river water to reservoir	45,000 (6)	60,000 (8)	67,500 (9)	75,000 (10)	54,300	72,400	81,450	90,500

\* ( ) Number of installations of structural alternatives

밭, 양수기 설치, 양수장 신설, 영산강-나주호 연계 양수저류 시설규모 결정하고 그에 따른 농업용수의 추가 공급량과 설치·운영비용을 산정한 것이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 내구성-비용지수 (RCI) 산정

초기저수율은 현재 재해의 심각성을 가늠하는 척도이며,

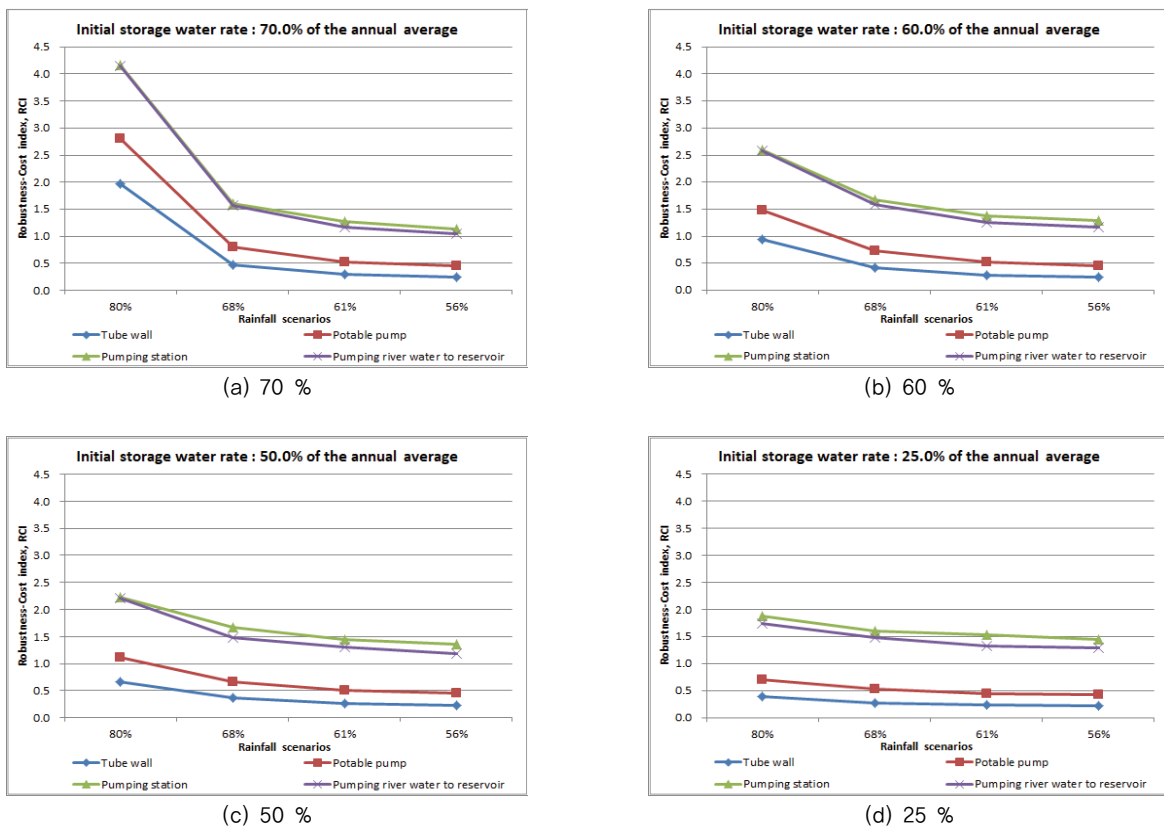
이후 강우량에 따라 재해규모 (가뭄)가 어떻게 바뀔지 결정된다. 따라서 초기저수율을 가뭄대책이 수립되기 시작하는 연평균저수율의 70 % (주의단계), 60 % (경계단계), 50 % (심각단계) 및 25 %에 대하여 내구성지수 (RI)를 각각 산출하여 초기 재해 영향을 고려하였다. 또한 Table 5에서 산정된 비용을 토대로 현재기반시설비용 (1,621억원)을 “식 (2)”에 대입하여 비용지수 (CI)를 산정하였다.

재해(가뭄)의 규모에 따른 구조적 대안 후보의 내구성-비용

**Table 6** Robustness–cost index (RCI) of the structural alternatives

SA \ RS	IS	70 % of the annual average				60 % of the annual average			
		80 %	68 %	61 %	56 %	80 %	68 %	61 %	56 %
A tube wall		1,97	0,47	0,30	0,24	0,94	0,41	0,29	0,24
Portable pump		2,80	0,80	0,53	0,44	1,48	0,72	0,52	0,45
Pumping station		4,17	1,60	1,27	1,13	2,60	1,67	1,38	1,28
Pumping river water to the water reservoir		4,14	1,56	1,17	1,05	2,58	1,58	1,26	1,16
SA \ RS	IS	50 % of the annual average				25 % of the annual average			
		80 %	68 %	61 %	56 %	80 %	68 %	61 %	56 %
A tube wall		0,66	0,36	0,27	0,24	0,39	0,28	0,23	0,21
Portable pump		1,11	0,66	0,51	0,45	0,71	0,53	0,45	0,42
Pumping station		2,22	1,67	1,44	1,36	1,87	1,61	1,53	1,45
Pumping river water to the water reservoir		2,21	1,48	1,31	1,18	1,73	1,48	1,32	1,28

\* IS: Initial storage, RS : Rainfall scenarios, SA : Structural alternatives



**Fig. 3** Comparison of robustness–cost index among structural alternatives according to drought scenarios (80, 68, 61, 56 %) and reservoir initial storage conditions (70, 60, 50, 25 %)

지수 (RCI)를 Table 6 및 Fig. 2와 같이 나타냈으며, 대안시설은 시나리오별 용수부족 현상을 해결 (저수율이 가뭄 심각단

계인 연평균 저수율의 50 %이상 유지)할 수 있도록 시설계획을 수립하여 내구성을 확보되도록 하였다. 또한 내구성이 확

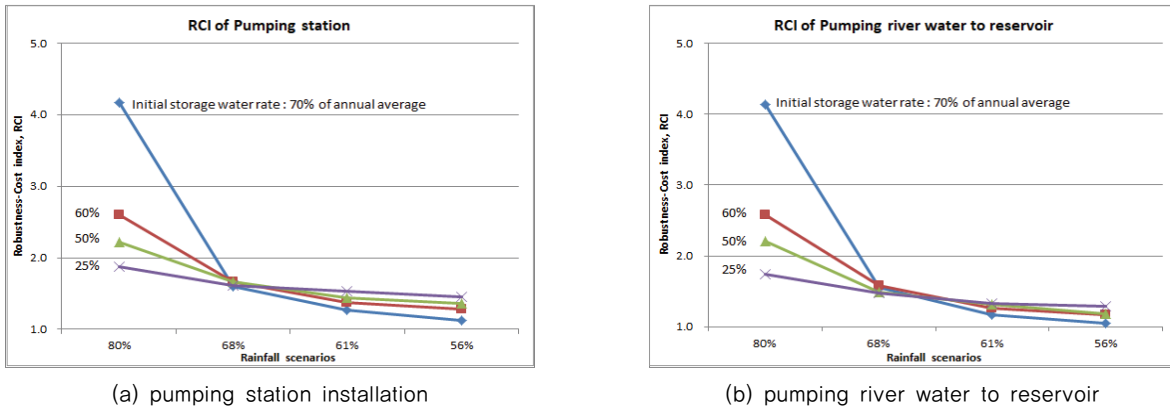


Fig. 4 Effect of initial storage conditions of reservoir on RCI of structural alternatives

보된 대안들은 비용지수 (CI)를 곱하여 내구성-비용지수 (RCI)를 산출하였다. RCI 값이 클수록 회복탄력성이 더 큰 대안으로 평가 할 수 있다.

## 2. 구조적 대안에 대한 고찰

구조적 대안 중 임시대책 (관정개발, 양수기 설치)은 평년 대비 강수량이 낮아질수록 내구성-비용지수 (RCI)가 1미만으로 나타났다. 내구성지수 (RI)가 용수공급 필요량을 모두 만족하도록 시설규모를 결정했다는 점을 고려할 때 강수량이 평년대비 80%, 70%, 60%로 점점 하락할수록 즉, 재해 (가뭄) 규모가 커짐에 따라 설치비용이 늘어나는 임시대책 (관정개발, 양수기 설치)은 효율성이 하락하여 가뭄이 지속될 경우 적절한 대책이 아닌 것으로 나타났다 (Fig. 3).

반면에 항구대책 (양수장 설치, 영산강-나주호 연계 양수저류)은 내구성지수, 비용지수에서 가뭄 시 임시대책에 비해 더 효율적인 대책임을 알 수 있다. 특히 중앙집중형인 영산강-나주호 연계 양수저류 방식과 분산형인 양수장 설치 방법이 비슷한 양상을 보이고 있으나, 사업비의 집중투자가 필요한 영산강-나주호 연계 양수저류 방식에 비해 말단부 용수공급 필요지역 분산에 따라 비교적 대응하기 편리한 양수장 설치방법이 더 합리적인 구조적 대안인 것을 확인할 수 있었다. 더욱이 중앙집중형은 영농지역까지 수로의 연장이 길어져 수로손실이 더 커지고 분산형은 말단부에 설치함으로써 수로의 연장을 감소시킴으로써 수로손실을 저감할 수 있다는 점을 감안할 때 재해 (가뭄) 감소효과는 더욱 클 것으로 판단된다. 다만, 분산형 시스템의 경우 중앙집중형 시스템과 비교할 때 재해 대응 측면에서는 유리하나, 유지관리 측면에서는 다소 불리한 점이 있다.

또한, 동일한 구조적 대안을 수립하더라도 초기저수율에 따라 내구성-비용지수 (RCI)가 크게 차이 나는 것을 볼 수 있

는데, 이는 재해 (가뭄) 초기 저수율을 고려한 가뭄대책의 수립시기도 매우 중요함을 알 수 있다 (Fig. 4). 따라서 가뭄대책은 조기에 수립하여 대책의 지연으로 해당 대책이 무의미해 지거나 추가비용이 발생하여 효율성이 떨어지지 않도록 조치할 필요가 있는 것으로 나타났다.

## IV. 결론

본 연구에서는 강우와 초기저수율에 따른 가뭄 시나리오를 설정하고, 농업용저수지로 부터 물 공급 부족문제를 해결하기 위해 임시대책과 항구 대책을 구조적 대안으로 선정하여 회복탄력적인 수자원 공급방안을 평가하는 내구성-비용지수 적용방안을 제시하였다.

구조적 대안 중 임시대책 (관정개발, 양수기 설치)은 평년 대비 강수량이 작아질수록 시설 설치 비용의 증가폭이 급격히 증가하여 내구성-비용지수가 1미만으로 분석되는 등 임시대책은 재해 (가뭄)의 초기에 효율성을 발휘하나, 가뭄이 지속될 경우 적절한 대책이 아닌 것으로 나타났다. 반면에 항구대책 (물부족지역 양수장 설치, 영산강-나주호 연계 양수저류)은 내구성지수, 비용지수에서 가뭄 시 임시대책에 비해 더 효율적인 대책임을 알 수 있었다. 따라서 저수지의 용량 추가 확보가 힘들고, 상류에 새로운 수원공을 개발하기 힘든 점을 감안할 때 영산강 일원에 양수장을 개발하여 보충 수원으로 활용하는 방안 및 영산강-나주호 연계 양수저류를 통해 주수원공의 수량을 확보하는 방안을 마련할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

하지만 기후변화에 의해 예상되는 재해규모를 초과하거나 예기치 못한 사고에 의해 발생하는 피해 등 다른 요인에 의한 복구 방안이 마련되도록 비구조적 대안도 고려가 필요하다. 또한 시나리오별 용수 부족량을 모두 해결할 수 있는 구조적



대안은 초기비용이 과다하게 산정되는 문제가 있었다. 따라서 향후 연구에는 비구조적인 대안을 병행하거나, 초기 재해 대응에 대한 세밀한 평가방법의 마련을 위한 추가적 연구가 필요하다.

## REFERENCES

1. Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., and von Winterfeldt, D., 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra* 19(4): 733-752. doi:10.1193/1.1623497
2. Folke, C., 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16: 253-267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002
3. Garnezy, N. 1985. Stress-resistant children: The search for protective factors. *Recent Research in Developmental Psychopathology* 4: 213-233.
4. Gallopín, G. C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global environmental change* 16(3): 293-303. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004
5. Holling, C. S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
6. Jung, J., Lee, C., An, J., Kim, J. and Choi, Y., 2016. Establishment of resilient infrastructures for the mitigation of an urban water problem: Robustness assessment of structural alternatives for the problem of water pollution. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 182-188 (in Korean).
7. Kang, D., Kim, T. W., and Ahn, J. H., 2013. Water resources infrastructure: substantiality and resilience. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(1): 309-315. doi:10.9798/KOSHAM.2013.13.1.309
8. Kim, B. I., Shin, S. C., Kim, D. Y., 2014a. Resilience assessment of dam's flood-control service. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34: 1919-1924 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2014.34.6.1919.
9. Kim, H. S., Choi, J. Y., and Shin, E. H., 2014b. Economic analysis based on the type of green roof initiatives: the case of Jung-gu Seoul. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 30(10): 159-167 (in Korean). doi:10.5659/JAIK\_PD.2014.30.10.159
10. Kim, T. H., Kim, H. J., and Lee, K. J., 2011. The concept and functional objectives of the urban resilience for disaster management. *Journal of the Korean Society of Safety* 26: 65-70 (in Korean).
11. Yoo, S. H., Choi, J. Y., Nam, W. H., Kim, T. G., Go, G. D., Developing Model of Drought Climate Scenarios for Agricultural Drought Mitigation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2): 67-75 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.2.067
12. Korean Rural Community Corporation (KRC), Rural infrastructures management system, <https://www.alimi.or.kr/dataview/a/waterStatus/selectYsNationalAggregate.do>; Retrieved on Dec 31 2017.
13. Lee, E. S., Noh, C. W. and Sung, J. S., 2014. Meaning structure of green infrastructure a literature review about definitions. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42: 65-76 (in Korean). doi:10.9715/KILA.2014.42.2.065
14. Lee, C., Jung, J., An, J., Kim, J. and Choi, Y., 2016. Establishment of resilient infrastructures for the mitigation of an urban water problem: 1. Robustness assessment of structural alternatives for the problem of urban floods. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3: 117-125 (in Korean). doi:10.17820/eri.2016.3.2.117.
15. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2017. Drought countermeasures price table (in Korean).
16. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2016. Statistical yearbook of land and water development for agriculture (in Korean).
17. National Infrastructure Advisory Council (NIAC), 2009. Critical Infrastructure Resilience. [http://www.dhs.gov/xlibrary/as-sets/niac/niac\\_critical\\_infrastructure\\_resilience.pdf](http://www.dhs.gov/xlibrary/as-sets/niac/niac_critical_infrastructure_resilience.pdf); Retrieved on Dec 1 2015.
18. Rutter, M., 1987. Psychosocial resilience and protective mechanisms. *American Journal of Orthopsychiatry* 57: 316-331. doi:10.1111/j.1939-0025.1987.tb03541.x
19. Rose, A., 2007. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards* 7: 383-398. doi:10.1016/j.envhaz.2007.10.001
20. Shin, S. J., Jung, D. Y. and Hwang, E. H., 2009. Concept analysis of resilience in patients with cardiovascular diseases. *Journal of Korean Academy of Nursing* 39: 788-795. doi:10.4040/jkan.2009.39.6.788

21. The Bank of Korea, Economic statistics system (ECOS), <http://ecos.bok.or.kr>; Retrieved on Dec 31 2017.
22. Vugrin, E. D. and Camphouse, R. C., 2011. Infrastructure resilience assessment through control design. *International Journal of Critical Infrastructures* 7: 243-260. doi:10.1504/IJCIS.2011.042994
23. Vugrin, E. D., Warren, D. E., Ehlen, M. A. and Camphouse, R. C., 2010. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In, Gopalakrishnan, K. and Peeta, S. (eds.), Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems, Springer-Verlan, Berlin, Germany. 77-116. doi:10.1007/978-3-642-11405-2\_3
24. Woo, H. S., 2011. Prevention of urban flood due to climate change. *Journal of Civil Engineering* 59: 5-7 (in Korean).
25. Yu, S. Y., Kim, S. W., Park, K. H., Oh, C. W., Park, D. K. and Kim, C. Y., 2012. Quantitative resilience analysis of Fiji to cyclones. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12: 55-63 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2012.12.2.055