

가뭄대비 농업용 지하댐 적지 평가 지표 개발 - 계층분석과정의 적용 -

명우호¹ · 송성호^{1*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

Development of Suitable Sites Assessment Criteria for Agricultural Subsurface Dam for drought Management using Analytic Hierarchy Process (AHP)

Woo-Ho Myoung¹ · Sung-Ho Song^{1*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

ABSTRACT

Climate change has often resulted in severe droughts in a rice-farming season (i.e., April to June), and the large amount of water resources were needed to cope with droughts during the season. Therefore, the subsurface dam, which is able to store groundwater resources in the alluvium aquifer, has been considered to be an alternative for securing more groundwater resources. In this study, suitable sites assessment criteria for agricultural subsurface dam using analytic hierarchy process (AHP) were established for adequate drought management. Moreover, the criteria were applied to the existing five agricultural subsurface dams to verify their applicability of groundwater supply for each subsurface dam. The assessment criteria were divided into three major categories (geology, hydrology and business condition) and classified to 12 individual sub-categories with weighting. From the assessment, Ian subsurface dam and Wool subsurface dam were identified as the best and the worst suitable site, respectively, and this result was in accordance with the average amount of annual groundwater supply by each subsurface dam during the period of 2011-2017.

Key words : Subsurface dam, Groundwater supply, Suitable site assessment criteria, Analytic hierarchy process (AHP)

1. 서 론

2015~2024년 기간 중 농업용 수리시설 신규·보강 개발 대상인 총 261지구(총 개발면적 46,527 ha) 중 지하수 이용시설의 설치가 포함된 곳은 총 2지구(개발면적 214 ha)에 해당하는 등 농업용수 관리 정책 수립에 있어서 지하수의 비중은 매우 적은 실정이다(MAFRA, 2014). 그러나 기후변화 가속화에 따른 2012년 서산·태안·예산 등 충남 서북부 지역 가뭄 발생 이후, 반복되는 국지적인 농업가뭄 발생으로 인하여 농업용수의 적기 공급에 차질을 빚고 있다. 특히 2017년 6월말을 기준으로 총저수량 1천만 m³ 이상인 예당저수지(충남 예산군), 청천저수지(충남 보령군), 고삼저수지 및 금광저수지(경기도 안성시)의 저수율이 10% 미만을 기록하는 등 강수량의 시·

공간적인 불확실성에 의한 가뭄의 영향이 점차 심화되고 있다. 이에 따라 반복되는 가뭄을 대비한 수자원의 추가 확보를 위하여, 다양한 방식의 지하댐에 대한 적용방안이 제시된 바 있다(Yong et al., 2017).

우리나라의 지하댐은 정부의 농업용수 10개년 개발계획(1982-1991)에 포함된 지하수 개발계획을 효과적으로 추진하기 위한 시범사업으로 시작하여, 현재까지 총 6개(농업용 5개, 생활용 1개)가 운영 중이다. 지하댐은 지하수가 유동하는 대수층 내에 인공적인 물막이벽을 설치하여 지하수를 대수층 내에 저류 또는 함양시킨 후, 관정이나 방사상 집수정(radial collector well) 등의 이용시설에 의해 취수하는 지하저류지를 말한다. 지하댐을 설치할 수 있는 지질 및 지형적 적지 조건은 유효공극률이 큰 대수층 발달에 유리한 지역으로, 물막이벽의 경제적인 설치가 가능

*Corresponding author : shsong@ekr.or.kr

Received : 2017. 11. 7 Reviewed : 2017. 11. 12 Accepted : 2017. 12. 8

Discussion until : 2018. 2. 28

한 지역이 유리한 것으로 알려져 있다.

이러한 지하댐의 적지에 대한 우선 순위 평가를 위하여 국내외에서 다양한 접근이 시도되고 있다. 국내의 경우 MICT and KWRC(2002)가 적지 평가 항목을 크게 자연 조건, 환경조건, 건설조건으로 나누고 이를 다시 14개의 세부 항목(충적층 분포면적, 충적층 구성물질, 대수층 두께, 유역면적, 하천경사, 하천유량, 지표수 수질, 오염원 분포, 토지이용 현황, 배후지 가옥 현황, 접근 용이성, 댐 길이, 시설물 분포 현황, 취수시설 설치 조건)으로 세분하여 항목별로 임의의 배점을 적용하는 방법을 적용한 바 있다. 또한 Lee and Kim(2003)은 MICT and KWRC(2002)가 제안한 지하댐의 적지 중 일부를 대상으로 다기준 의사결정(multi-criteria decision making) 기법인 계층 분석과정(analytic hierarchy process)을 적지 평가 기법으로 적용하였다. 이외에도 Kim et al. (2004)과 Lee et al.(2004)이 계층분석과정을 이용하여 지표수-지하수 연계 운영 방안으로서의 지하댐의 적지 평가를 수행한 바 있다.

해외의 경우 주로 GIS 기법을 적용하여 지하댐의 적지 평가를 수행하였는데 Sehat et al.(2013)과 Afifi and Fuladipannah(2015)은 개별 속성에 임의의 가중치를 적용하여 적지 평가를 수행하였고, Ali Jamali et al.(2014), Dorfeshan et al.(2014) 및 Barkhordari(2015)는 계층분석과정을 통한 개별 속성의 가중치를 결정하여 적지 평가를 수행한 바 있다. Ali et al.(2014)의 경우에는 GIS 기법과 지표투과 레이더(ground penetrating radar) 탐사 등의 현장조사 기법을 적용한 적지 평가를 수행하였으며, 우리나라의 경우 Lee and Lee(2004)가 계층분석과정을 적용한 지하댐-강변여과수 적지 분석 소프트웨어를 개발한 바 있다.

그러나 앞서 제시한 연구들은 주로 수리지질학적인 인자들에 대한 평가 비중이 상대적으로 높고 용수 수요에 대한 평가 비중이 상대적으로 약하며, 국내 연구의 경우 생활용수 공급에 대한 연구로 농업용수 공급에 대한 여건에 부합하지 않는다는 단점이 있다. 또한 유효공극률, 투수계수, 대수층 두께, 하천 경사 등의 수리지질학적인 평가 지표가 지하댐의 설치에 따른 지하수 저류량의 증가와의 수리지질학적인 관계 규명 없이 개별 지표에 대한 임의의 가중치를 적용하여 평가를 실시하였다는 한계가 있다.

따라서 본 연구는 국내에 설치된 농업용 지하댐에 대하여 계층분석과정을 적용한 적지 평가 기준 선정과 개별 지하댐의 방사상 집수정을 통하여 공급된 지하수량과의 비교를 통한 평가 기준의 타당성을 검증하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 연구방법

2.1. 국내 농업용 지하댐 운영 현황

우리나라의 농업용 지하댐은 정부에 의해 수립된 농업용수 개발계획의 일환으로 1984년 이안지하댐(경북 상주시)의 준공을 시작으로, 남송지하댐(경북 포항시), 옥성지하댐(충남 공주시), 고천지하댐 및 우일지하댐(전북 정읍시)이 각각 1986년에 준공되었다. 지하수 대량 취수시설인 방사상 집수정은 고천지하댐 상류부에 5기가 설치된 반면, 이안지하댐, 남송지하댐, 옥성지하댐, 우일지하댐 상류부에 각각 4기가 설치되었다.

이안지하댐과 고천지하댐은 각각 해당 수혜구역의 주수원공으로 설치된 지하수 독립형 공급시설이다. 반면 옥성지하댐은 취입보가 주수원공인 수혜구역에 보조수원공으로 설치되었고, 남송지하댐과 우일지하댐은 저수지가 주수원공인 수혜구역에 각각 보조수원공으로 설치된 지표수-지하수 연계 공급시설이다. 이 중 우일지하댐은 지난 2005년 지표수 보강개발이 이루어짐에 따라 가뭄대비 비상수원으로 용도 전환되었다.

2.2. 지하댐 이용량 분석

지하댐 이용량은 각 지하댐의 상류부에 설치된 방사상 집수정의 이용량의 합으로 산출하였다. 방사상 집수정의 이용량은 Yong et al.(2017)이 제안한 방사상 집수정의 제원을 고려한 시간당 펌프 유량과 전기 이용량 자료를 기초로 산출된 가동 시간을 통해 환산한 양수량을 사용하였다. 지하댐의 이용량은 2011년부터 2017년까지 최근 7년간의 전기 이용량 자료를 토대로 환산하였으며 그 결과는 Fig. 1에 제시하였다.

지하댐 이용량은 이안지하댐이 546~1,425천 m³, 남송지하댐이 113~260천 m³, 옥성지하댐이 36~801천 m³, 고천지하댐이 382~856천 m³이며, 우일지하댐은 이용실적이 거의 없는 것으로 집계되었다. 이안지하댐과 고천지하댐은 남송지하댐과 옥성지하댐에 비하여 지속적으로 높은 이용량을 기록하였는데, 이는 전술한 바와 같이 이안지하댐과 고천지하댐이 수혜구역의 주수원공 역할을 하고 있기 때문으로 판단된다.

옥성지하댐과 남송지하댐은 각각 지표수 취수시설인 취입보와 저수지를 주수원공으로 하는 수혜구역의 보조수원 역할을 하는 시설이지만 옥성지하댐의 이용량이 남송지하댐의 이용량에 비해 상대적으로 많은 편이다. 이는 옥성지하댐의 주수원인 취입보의 용수 공급 안정성이 남송지하댐의 주수원인 저수지의 용수 공급 안정성보다 낮음을

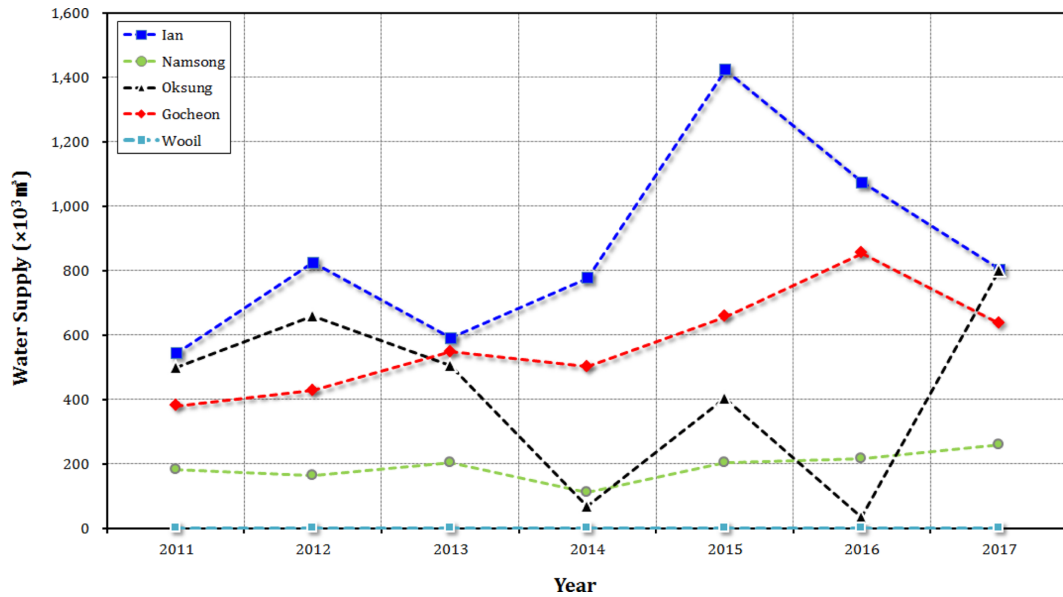


Fig. 1. Comparison of annual groundwater supply from radial collector wells in 5 subsurface dams (2011~2017).

Table 1. Saaty's scales for pairwise comparison (Saaty, 1980)

Scale	Description of preference
1	Equally
2	Equally to moderately
3	Moderately
4	Moderately to strongly
5	Strongly
6	Strongly to very strongly
7	Very strongly
8	Very strongly to extremely
9	Extremely

의미한다.

7년간 연평균 지하담 이용량은 이안지하담 864천 m³, 고천지하담 574천 m³, 옥성지하담 426천 m³, 남송지하담 192천 m³ 순으로 분석되었다.

2.3. 계층분석과정

계층분석과정은 다수의 속성들을 계층적으로 분류하여 각 속성의 중요도를 파악하고 최적의 대안(alternatives)을 선정하는 다기준 의사결정 기법이다(Saaty, 1977; Saaty, 1980). 계층분석과정은 기준(여기서는 지표, criteria) 및 하위 기준(여기서는 하위 지표, sub-criteria)들의 상대적 중요도(가중치, weight), 그리고 각 기준 하에서 대안의 우선 순위(또는 선호도, priority)를 측정할 때 상대적인 비교를 수행하는데, 적용 방법은 여러 기준 또는 대안들을 한꺼번에 비교하지 않고 한 번에 두 개씩 비교하는

쌍대비교(또는 이원비교, pairwise comparison)를 실시한다. 쌍대비교를 하는 기준 또는 대안들에 대한 상대적 중요도는 1에서 9까지의 비율척도를 적용하며 각 수치의 의미는 Table 1과 같다.

쌍대비교의 일반적인 형태는 식 (1)과 같이 n개의 기준 또는 대안들에 대하여 n×n의 대각선 행렬(diagonal matrix)로 표현할 수 있으며, 각 대안들에 대한 선호도는 대각선을 중심으로 역수의 관계에 있으며 이를 쌍대비교 행렬이라고 한다(Saaty, 1980).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 5개의 대안에 대하여 표현한 예시는 Table 2와 같다. Table 2에서 대안 A는 C보다 동일하거나 조금 더(equally to moderately) 선호되는 척도 '2'를 1행 3열에 표시하고, 그 역수인 '1/2'을 대각선을 중심으로 대칭에 위치하는 3행 1열에 표시한다. 대안 C의 경우 B보다 강하게(strongly) 선호되는 척도 '5'를 3행 2열에 표시하고, 그 역수인 '1/5'을 대각선을 중심으로 대칭에 위치하는 2행 3열에 표시한다.

이러한 방식으로 구하여진 이원비교행렬의 각 요소는 행렬 A의 각 열(column)에 대한 합(S_j)을 각 요소에 대

Table 2. An example of pairwise comparison matrix for 5 alternatives

Alternatives	A	B	C	D	E
A	1	1/3	2	9	5
B	3	1	1/5	6	5
C	1/2	5	1	1/4	3
D	1/9	1/6	4	1	1/2
E	1/5	1/5	1/3	2	1

하여 나누어 정규화 행렬(normalized matrix, A')을 구한다[식 (2), 식 (3)].

$$V_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \tag{2}$$

$$A' = \begin{bmatrix} 1 & V_{12} & V_{13} & \dots & V_{1n} \\ V_{21} & 1 & V_{23} & \dots & V_{2n} \\ V_{31} & V_{32} & 1 & \dots & V_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ V_{n1} & V_{n2} & V_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

정규화 행렬의 각 행(row)의 평균을 산출하여 각 기준 또는 대안들에 대한 상대적 선호도를 구할 수 있고 식 (4)와 같이 열벡터로 표현한다.

$$w = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

이를 선호도 벡터(priority vector, PV)라고 한다. 이를 식 (1)의 행렬 A에 곱하면 다음과 같은 관계식 (5)가 성립한다.

$$A \cdot w = n \cdot w \tag{5}$$

여기서 A가 n×n 행렬일 경우, 다음의 식으로 표현한다.

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \tag{6}$$

식 (6)에서 구하게 되는 n개의 고유값(eigenvalue, λ) 중 가장 큰 고유값인 λ_{max}의 값은 n이 되고 나머지 (n-1)개의 고유값은 0이 된다. 그러나 쌍대비교 결과를 모아놓은 행렬 A는 완벽한 일관성을 갖추지 못하므로, (λ_{max}-n)이 0에 가까울수록 쌍대비교 행렬은 일관적이라고 평가한다. 계층분석기법에서는 쌍대비교의 가중치에 대한 일관

Table 3. Random Index for alternative n

n	Random Index	n	Random Index
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.42
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49
6	1.24	11	1.51

성을 검토하기 위하여 일관성 지수(consistency index, CI)와 일관성 비율(consistency ratio, CR)을 이용하는데 이는 다음의 식 (7)과 식 (8)로 표현된다.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{7}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{8}$$

RI는 무작위 지수(random index)이며 n개의 대안에 대한 무작위 지수는 Table 3에 제시하였다. 여기서 CR이 0.1 미만인 경우, 쌍대비교 행렬은 일관성이 있다고 판단할 수 있다.

2.4. 적지 평가 지표 선정

적지 평가 지표(suitable sites assessment criteria)는 크게 2개의 계층(hierarchy)으로 구성하였으며, 적지 평가에 고려할 지표를 크게 지질(geology), 수문(hydrology), 사업 여건(business condition)으로 분류하고 다음과 같이 하위 지표를 선정하였다.

2.4.1. 지질

지질에 대한 하위 지표는 지하담 효율(efficiency of subsurface dam)과 대수층 교란여부(disturbance of aquifer)로 선정하였다. 지금까지의 연구에서는 지하담 적지 선정을 위한 수리지질학적 평가 지표로 유효공극률, 투수계수, 대수층 두께, 하천 경사 등이 적용된 바 있다(Lee and Kim, 2003; Kim et al., 2004; Sehat et al., 2013; Ali Jamali et al., 2014; Dorfeshan et al., 2014; Afifi and Fuladipanah, 2015). 그러나 전술한 바와 같이 각각의 수리지질학적 평가 지표와 지하담의 설치에 따른 지하수의 저류량 증가로 표현할 수 있는 지하담 효율과의 수리지질학적인 관계에 관한 규명보다는 개별 지표에 대한 계층분석과정의 적용을 통한 가중치를 적용하였다.

이 중 지하담 효율은 Park(2017)이 제안한 대수층의 투수계수, 하상경사, 충적층 두께 등의 수리지질학적 인자를 포함한 통계함수를 적용하여 산출하였다(Table 4).

Table 4. Information of subsurface dams in geology

Sub-criteria	Ian	Namsong	Oksung	Gocheon	Wooil
Efficiency of subsurface dam	353	16	7.95	16	16
Disturbance of aquifer	Aggregate (2015)	Aggregate (2004)	Non	Non	Non

Table 5. Information of subsurface dams in hydrology

Sub-criteria	Ian	Namsong	Oksung	Gocheon	Wooil
Catchment area (ha)	2,130	15,300	27,500	2,700	2,200
Normal annual precipitation (mm)	1,259.8	1,152.0	1,349.2	1,317.3	1,317.3
Surface water quality	III	III	Ib	III	II
Minimum flow of stream (m ³ /sec)	0.0	0.64	1.17	0.45	0.07
Drought frequency (SPI 6)	0.60	0.57	0.87	0.80	0.90

Table 6. Information of subsurface dams in business condition

Sub-criteria	Ian	Namsong	Oksung	Gocheon	Wooil
Benefited area (ha)	120	155	146	134	99
Frequency of design drought for the existing irrigation facility	Non	10	5	Non	10
Installation plan of irrigation facility	×	×	×	×	o
Development plan of housing, industrial complex and et cetera	×	×	×	×	×
Dam length	230	89	482	192	778

일반적으로 지하댐의 대상이 되는 대수층은 투수계수가 높고 유효공극률이 큰 양질의 사질층 또는 혼전석층을 대상으로 하므로, 골재채취 등에 의한 대수층 효율저하의 가능성이 상존한다. 실제 이안지하댐과 남송지하댐 상류부 방사상 집수정 인근에서 육상 골재채취가 이루어짐에 따라, 대수층의 교란여부는 중요한 지하댐 적지 선정 지표로 판단된다.

2.4.2. 수문

수문에 대한 하위 지표는 유역면적(catchment area), 평년 강수량(normal annual precipitation), 지표수 수질(surface water quality), 하천 갈수량(minimum flow of stream), 가뭄발생 빈도(drought frequency)로 선정하였다. 이들 지표들은 농업용수의 주수원공 역할을 하는 지표수의 취수조건을 대표하는 지표이며, 지표수 수질은 지하수 수질에 영향을 미치므로 평가 지표에 포함하였다(Table 5).

2.4.3. 사업여건

사업여건에 대한 하위 지표는 농업생산기반시설의 주요 적지 검토 대상 지표인 수혜면적(benefited area), 기존 수리시설물 한발빈도(frequency of design drought for the existing irrigation facility), 수리시설물 확충 계획(installation plan of irrigation facility), 주변지역 개발

계획(development plan of housing, industrial complex and et cetera)과 주요 경제성 평가 지표로 검토될 수 있는 제체 길이(dam length)로 선정하였다. 우리나라의 농업용 수리시설물은 10년 빈도 한발에 견딜 수 있는 내한능력을 기준으로 설계를 하는데 한발빈도가 낮을수록 가뭄에 견딜 수 있는 능력이 낮음을 의미한다. 수리시설물 확충 계획과 주변지역 개발 계획은 추가 용수 수요에 대한 평가지표이며, 제체의 길이는 토지보상 및 공사비의 경제성을 고려할 중요한 평가지표이다. 우일지하댐의 경우 1986년 준공 이후 2005년 추가 지표수 보강개발로 인하여 시설이 보조수원에서 가뭄대비 비상용수원으로 전환되었다(Table 6).

2.5. 평가 지표의 가중치 산출

앞서 제시한 바와 같이 총 2개의 계층으로 구조화된 적지 평가 지표의 상대적 중요도는 계층분석기법을 적용하였으며, 이를 통해 각 평가 지표의 가중치와 CR을 산출하였다(Table 7). 본 연구에서는 지질학적 특성이나 수문학적 특성보다는 용수 수요를 지시하는 사업 여건의 중요도를 상대적으로 높게 평가하였으며, 그 중에서도 수리시설물 확충계획을 가장 중요한 평가 지표로 선정하였다. 산출된 주요 세부지표의 최종 가중치를 살펴보면 수리시설물 확충계획, 지하댐 효율, 기존 수리시설물 한발빈도, 주

Table 7. Suitable site assessment criteria with consistency ratio (CR) and weight

Criteria	Importance (A)	CR	Sub-criteria	Importance (B)	CR	Weight (W=A×B)
Geology	0.312		Efficiency of subsurface dam	0.667	-	0.208
			Disturbance of aquifer	0.333		0.104
Hydrology	0.198	0.046	Catchment area	0.121	0.036	0.024
			Normal annual precipitation	0.219		0.043
			Surface water quality	0.121		0.024
			Minimum flow of stream	0.253		0.050
			Drought frequency	0.286		0.057
			Benefited area	0.043		0.021
Business condition	0.490		Frequency of design drought for the existing irrigation facility	0.275	0.052	0.135
			Installation plan of irrigation facility	0.433		0.212
			Development plan of housing, industrial complex and et cetera	0.218		0.107
			Dam length	0.031		0.015

Table 8. Pairwise comparison matrix, PV and CR for geology

Sub-criteria	Comparison Matrix						PV	CR
	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	
Efficiency of subsurface dam	IA*	1	5	7	5	5	0.5677	0.0034
	NS**	1/5	1	2	1	1	0.1221	
	OS***	1/7	1/2	1	1/2	1/2	0.0660	
	GC****	1/5	1	2	1	1	0.1221	
	WI*****	1/5	1	2	1	1	0.1221	
	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	
Disturbance of aquifer	IA*	1	1	1/3	1/3	1/3	0.0909	0.0000
	NS**	1	1	1/3	1/3	1/3	0.0909	
	OS***	3	3	1	1	1	0.2727	
	GC****	3	3	1	1	1	0.2727	
	WI*****	3	3	1	1	1	0.2727	
	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	

*IA : Ian, **NS : Namsong, ***OS : Oksung, ****GC : Gocheon, *****WI : Woolil

변지역 개발계획, 대수층 교란여부의 순으로 가중치가 높게 산출되었다.

3. 연구결과

3.1. 기설 지하댐 적지 평가 결과

Table 7에서 제시한 평가 지표를 기준으로 기설 지하댐에 대한 적지 평가를 실시하였다. 기설 지하댐 5개소에 대한 하위 지표별 쌍대비교를 실시하고, PV와 CR을 산출하여 Table 8~10에 각각 제시하였다.

3.2. 적합도 산출

각각의 평가지표에 대하여 현재 국내에 운영 중인 지하

댐 5개에 대한 우선 순위를 평가하였다. 적합도(suitability index, SI)는 지하댐의 최적지에 대한 평가 결과로 각 평가지표의 가중치와 평가지표 하에서의 각 지하댐의 선호도 벡터의 곱을 모두 합하여 평가하며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$SI = W_1 \cdot P_1 + W_2 \cdot P_2 + \dots + W_n \cdot P_n \tag{9}$$

여기서 W_n 은 각 평가지표에 대한 가중치이며, P_n 은 각 평가지표에 대한 대안들의 선호도 벡터이다.

식 (9)에 의하여 기설 지하댐 5개소에 대한 SI 산출 결과는 Table 11에 제시하였다. 그 결과 SI는 이안지하댐이 가장 높았으며, 고천지하댐, 옥성지하댐, 남송지하댐, 우일지하댐 순으로 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 1에 제

Table 9. Pairwise comparison matrix, PV and CR for hydrology

Sub-criteria	Comparison Matrix						PV	CR
Catchment area	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0059
	IA*	1	1/4	1/5	1	1	0.0824	
	NS**	4	1	1/2	4	4	0.3010	
	OS***	5	2	1	5	5	0.4519	
	GC****	1	1/4	1/5	1	1	0.0824	
	WI*****	1	1/4	1/5	1	1	0.0824	
Normal annual precipitation	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0304
	IA*	1	1/2	2	2	2	0.2453	
	NS**	2	1	2	2	2	0.3231	
	OS***	1/2	1/2	1	1/2	1/2	0.1085	
	GC****	1/2	1/2	2	1	1	0.1615	
	WI*****	1/2	1/2	2	1	1	0.1615	
Surface water quality	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0022
	IA*	1	1	1/3	1	1/2	0.1239	
	NS**	1	1	1/3	1	1/2	0.1239	
	OS***	3	3	1	3	2	0.3939	
	GC****	1	1	1/3	1	1/2	0.1239	
	WI*****	2	2	1/2	2	1	0.2344	
Minimum flow of stream	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0233
	IA*	1	3	4	3	2	0.3911	
	NS**	1/3	1	2	1/2	1/3	0.1100	
	OS***	1/4	1/2	1	1/2	1/4	0.0731	
	GC****	1/3	2	2	1	1/2	0.1535	
	WI*****	1/2	3	4	2	1	0.2722	
Drought frequency	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0153
	IA*	1	2	1/3	1/2	1/4	0.0986	
	NS**	1/2	1	1/4	1/3	1/5	0.0624	
	OS***	3	4	1	2	1/2	0.2618	
	GC****	2	3	1/2	1	1/3	0.1611	
	WI*****	4	5	2	3	1	0.4162	

*IA : Ian, **NS : Namsong, ***OS : Oksung, ****GC : Gocheon, *****WI : Woolil

시된 지하담의 이용량 순서와 일치하는데, 이는 지하담의 적지 선정 평가 지표의 중요도를 판정함에 있어서 지질 또는 수문보다는 사업여건이 상대적으로 중요한 것으로 판단된다.

주요 하위지표 중 수리시설물 확충계획과 기존 수리시설물 한발빈도의 상대적 중요도를 평가하고자 주수원공인 저수지의 한발빈도가 10년으로 동일한 남송지하담과 우일지하담의 적합도와 연평균 이용량을 비교하였다. 남송지하담과 우일지하담의 경우 주수원공인 용연저수지와 섬진저수지의 한발빈도가 각각 10년으로 동일하였으나, 우일지하담의 경우 준공 이후 지표수 보강 개발로 인하여 보조수원에서 비상수원으로 그 역할이 변경되었다. 따라서 연평균 이용량이 사실상 없었다(Table 11). 그러므로 적지

평가에 있어서 수리시설물 확충계획은 기존 수리시설물 한발빈도보다 상대적으로 중요한 지표임을 알 수 있다.

기존 수리시설물의 한발빈도와 지하담 효율의 상대적 중요도를 평가하고자 이안지하담과 고천지하담의 적합도와 연평균 이용량을 비교하였다. 이안지하담과 고천지하담은 각각 수혜구역의 주수원 역할을 하는 시설로 해당 지표에서 동등한 평가를 받는다. 그러나 지하담 효율의 경우 이안지하담과 고천지하담의 효율은 각각 353과 16으로 이안지하담의 효율이 상대적으로 높았으며(Table 4), 적합도 역시 이안지하담이 고천지하담보다 높게 평가되었다. 따라서 기존 수리시설물 한발빈도보다 지하담 효율이 상대적으로 중요한 지표임을 알 수 있다.

수리시설물 확충계획과 지하담 효율의 상대적 중요도를

Table 10. Pairwise comparison matrix, PV and CR for business condition

Sub-criteria	Comparison Matrix						PV	CR
Benefited area	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0291
	IA*	1	1/2	1/2	1/2	2	0.1381	
	NS**	2	1	2	2	3	0.3374	
	OS***	2	1/2	1	2	3	0.2559	
	GC****	2	1/2	1/2	1	2	0.1814	
	WI*****	1/2	1/3	1/3	1/2	1	0.0871	
Frequency of design drought for the existing irrigation facility	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0012
	IA*	1	5	3	1	5	0.3642	
	NS**	1/5	1	1/2	1/5	1	0.0703	
	OS***	1/3	2	1	1/3	2	0.1309	
	GC****	1	5	3	1	5	0.3642	
	WI*****	1/5	1	1/2	1/5	1	0.0703	
Installation plan of irrigation facility	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0000
	IA*	1	1	1	1	9	0.2432	
	NS**	1	1	1	1	9	0.2432	
	OS***	1	1	1	1	9	0.2432	
	GC****	1	1	1	1	9	0.2432	
	WI*****	1/9	1/9	1/9	1/9	1	0.0270	
Development plan of housing, industrial complex and et cetera	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0000
	IA*	1	1	1	1	1	0.2000	
	NS**	1	1	1	1	1	0.2000	
	OS***	1	1	1	1	1	0.2000	
	GC****	1	1	1	1	1	0.2000	
	WI*****	1	1	1	1	1	0.2000	
Dam length	Dam	IA*	NS**	OS***	GC****	WI*****	PV	0.0153
	IA*	1	1/3	2	1/2	3	0.1611	
	NS**	3	1	4	2	5	0.4162	
	OS***	1/2	1/4	1	1/3	2	0.0986	
	GC****	2	1/2	3	1	4	0.2618	
	WI*****	1/3	1/5	1/2	1/4	1	0.0624	

*IA : Ian, **NS : Namsong, ***OS : Oksung, ****GC : Gocheon, *****WI : Wooil

Table 11. Result of suitable site assessment

Subsurface dam	Suitability Index	Rank	Average annual water supply ['11~'17] ($\times 10^3$ m ³)	Rank
Ian	0.2957	1	863.76	1
Namsong	0.1640	4	191.80	4
Oksung	0.1830	3	425.57	3
Gocheon	0.2125	2	573.85	2
Wooil	0.1448	5	0.01	5

평가하고자 남송지하담과 옥성지하담의 적합도와 연평균 이용량을 비교하였다. 남송지하담과 옥성지하담의 지하담 효율은 각각 16과 7.9로 남송지하담이 옥성지하담보다 상대적으로 높았고, 수리시설물 확충 계획의 경우 두 지하담 모두 준공 이후 수리시설물 보강 개발이 없었다. 그럼

에도 불구하고 적지 평가에 의한 적합도와 연평균 이용량은 옥성지하담이 남송지하담보다 높게 나타났다. 지하담 효율이 각각 16으로 동일한 남송지하담과 우일지하담을 비교한 결과, 수리시설물 확충은 전술한 바와 같이 우일지하담만 유일하게 준공 이후 지표수 보강개발이 이루어

Table 12. Weight change for each criteria according to 6 scenarios

Criteria	Sub-criteria	Scenario 1 (Original)	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
Geology	Efficiency of subsurface dam	0.208	0.208	0.327	0.123	0.208	0.208
	Disturbance of aquifer	0.104	0.104	0.163	0.368	0.104	0.104
	Consistency ratio (CR)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hydrology	Catchment area	0.024	0.024	0.024	0.024	0.059	0.128
	Normal annual precipitation	0.043	0.043	0.043	0.043	0.108	0.048
	Surface water quality	0.024	0.024	0.024	0.024	0.059	0.031
	Minimum flow of stream	0.050	0.050	0.050	0.050	0.124	0.204
	Drought frequency	0.057	0.057	0.057	0.057	0.140	0.079
	Consistency ratio (CR)	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.015
	Benefited area	0.021	0.231	0.013	0.013	0.009	0.009
Business condition	Frequency of design drought for the existing irrigation facility	0.135	0.071	0.057	0.057	0.140	0.079
	Installation plan of irrigation facility	0.212	0.023	0.135	0.135	0.085	0.085
	Development plan of housing, industrial complex and et cetera	0.107	0.034	0.068	0.068	0.043	0.043
	Dam length	0.015	0.132	0.010	0.010	0.006	0.006
	Consistency ratio (CR)	0.052	0.001	0.052	0.052	0.052	0.052

Table 13. Result of suitable site assessment according to 6 scenarios

Subsurface dam	Scenario 1 (Original)		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5		Scenario 6	
	SI*	Rank	SI*	Rank	SI*	Rank	SI*	Rank	SI*	Rank	SI*	Rank
Ian	0.2957	1	0.2594	1	0.3223	1	0.2248	2	0.2629	1	0.2757	1
Namsong	0.1640	4	0.2182	2	0.1490	5	0.1426	5	0.1654	5	0.1685	5
Oksung	0.1830	3	0.1792	4	0.1716	3	0.2138	3	0.1963	2	0.1996	2
Gocheon	0.2125	2	0.1970	3	0.1959	2	0.2267	1	0.1880	3	0.1830	3
Wooil	0.1448	5	0.1462	5	0.1613	4	0.1921	4	0.1874	4	0.1731	4

*SI : Suitability Index

졌고 가동실적이 전무하였다. 따라서 수리시설물 확충계획은 지하댐 효율보다 상대적으로 중요한 지표임을 알 수 있다.

3.3. 평가 지표 민감도 분석

각각의 평가지표에 대한 민감도 분석을 위하여 각 평가지표의 가중치를 변경하고 그에 따른 지하댐의 적합도 평가의 변화 양상을 분석하였다. 가중치 변경 시나리오는 Table 7에 제시한 평가 지표 가중치를 포함하여 총 6개의 시나리오를 작성하였으며 각 시나리오별 가중치 변경에 관한 세부 내용은 Table 12에 제시하였다.

시나리오 2는 시나리오 1과 비교하여 주요 지표인 사업여건과 지질, 수문의 상대적 중요도를 동일하게 평가하고, 사업여건의 하위 지표 중 수해면적과 제체 길이의 상대적 중요도를 높게 평가하였으며, 수리시설 확충계획의 상대

적 중요도를 낮게 평가하였다. 시나리오 3은 시나리오 1과 비교하여 하위 지표의 상대적 중요도는 동일하게 평가하였으나 주요 지표의 상대적 중요도를 지질, 사업여건, 수문 순으로 평가하였다. 시나리오 4는 시나리오 3과 비교하여 주요 지표의 상대적 중요도를 동일하게 평가하고, 지질의 하위 지표 중 대수층 교란여부의 상대적 중요도를 높게 평가하였다. 시나리오 5는 시나리오 1과 비교하여 하위 지표의 상대적 중요도는 동일하게 평가하였으나 주요 지표의 상대적 중요도를 수문, 사업여건, 지질 순으로 평가하였다. 시나리오 6은 시나리오 5와 비교하여 주요 지표의 상대적 중요도를 동일하게 평가하고 수문분야 하위 지표 중 하천 갈수량의 상대적 중요도를 가장 높게 평가하였다.

시나리오의 변화에 따른 하부 지표 중 가장 높은 가중치를 적용한 지표는 시나리오 2에서는 수해면적, 시나리

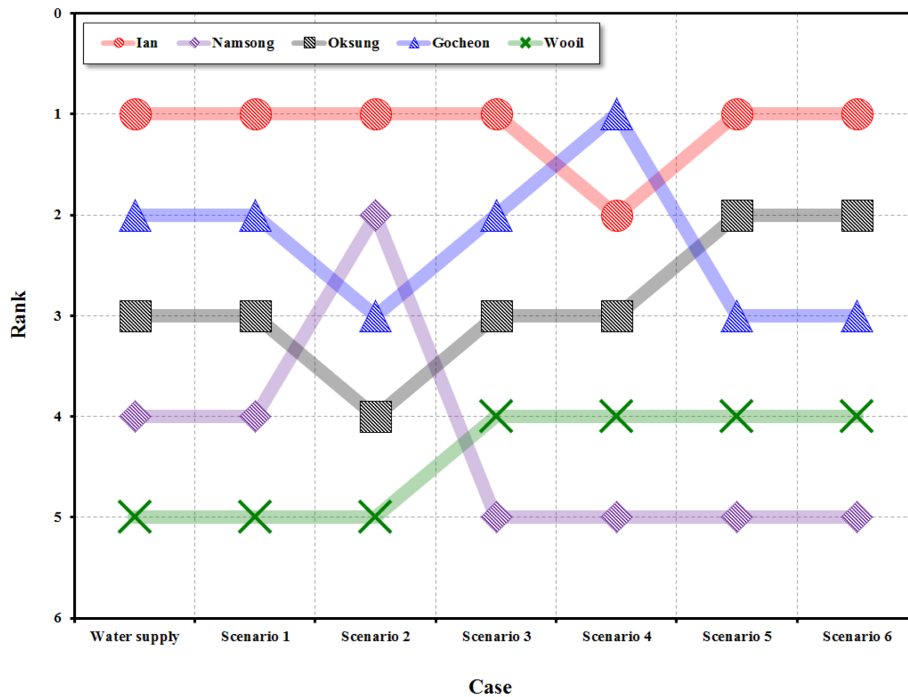


Fig. 2. Rank changes according to each scenario for 5 subsurface dams.

오 3에서는 지하댐 효율, 시나리오 4에서는 대수층 교란 여부, 시나리오 5에서는 가뭄 발생빈도 및 기설 수리시설물 한발빈도, 시나리오 6에서는 하천 갈수량이다.

각 시나리오에 제시된 가중치에 따라 평가된 지하댐의 적지 평가 결과는 Table 13에 적합도(SI)와 적지 평가 순위(rank) 순으로 제시하였고, Fig. 2에 지하댐 이용량 순위와 시나리오별 적지 평가 순위를 함께 제시하였다.

그 결과 이안지하댐과 고천지하댐이 전반적으로 모든 시나리오에서 가장 높은 수준의 적합도를 평가받았다. 이는 이안지하댐과 고천지하댐이 해당 수혜구역의 주수원이며 지하댐 효율이 비교적 높았기 때문으로 판단된다. 지하댐 이용량의 순위와 비교하였을 때 적합한 시나리오는 Table 7에 제시한 가중치를 적용한 시나리오 1이며, 임의로 가중치를 변경 적용한 나머지 시나리오 2~7의 경우 지하댐 이용량 순위와 일치하지 않았다.

4. 결 론

기후변화로 인한 가뭄의 상시화로 인하여 지하댐에 대한 관심이 날로 증가하고 있으나 그 적지에 대한 분석 기준은 아직 명확하게 정립되어 있지 않다. 특히 국내외 관련 연구들의 경우에는 생활용수를 대상으로 주로 수리지질학적인 인자들에 대한 평가 결과의 검증과정이 부족

한 단점이 있어, 본 연구에서는 농업용수 확보를 위한 지하댐을 대상으로 계층분석과정을 적용한 적지 평가 기준 선정과 개별 지하댐의 방사상 집수정을 통하여 공급된 지하수량과의 비교를 통한 평가 기준의 타당성을 검증하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 가뭄대비 농업용 지하댐 적지 분석을 위한 적지 평가에 고려할 지표들 크게 지질, 수문, 사업여건으로 분류한 후, 각각에 대하여 총 12개의 세부지표를 도출하였다. 또한 계층분석과정을 통하여 12개 지표의 가중치를 산출하고 현재 국내에 운영 중인 5개의 농업용 지하댐에 대한 평가를 실시하여 그 타당성을 검증하였다. 평가 지표 선정 과정에서는 농업용수 수요를 지시하는 사업 여건의 중요도를 상대적으로 높게 평가하였으며, 특히 수리시설물 확충계획을 가장 중요한 평가 지표로 선정하였다. 또한 수리시설물 확충계획, 지하댐 효율, 기존 수리시설물 한발빈도, 주변지역 개발계획, 대수층 교란여부의 순으로 가중치가 높게 산출되었다.

이러한 각각의 평가지표를 이용하여 현재 국내에 운영 중인 지하댐 5개에 대한 우선 순위를 평가를 위한 방법으로, 각 평가지표의 가중치와 평가지표 하에서의 각 지하댐의 선호도 벡터의 곱을 모두 합한 적합도를 이용하였다. 5개 농업용 지하댐에 대한 적합도 평가 결과, 이안지하댐, 고천지하댐, 옥성지하댐, 남송지하댐, 우일지하댐 순으로 낮아지는 것으로 나타났다.

이러한 평가 결과의 검증을 위하여 2011년~2017년 연간 평균 지하수 공급량을 분석하였다. 분석 결과 이안지하댐(864천 m³), 고천지하댐(574천 m³), 옥성지하댐(426천 m³), 남송지하댐(192천 m³), 우일지하댐(0.01천 m³) 순으로 나타남에 따라, 본 연구를 통하여 도출한 가뭄대비 농업용 지하댐 적지 평가 순서와 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 도출한 적지 평가 지표와 각 지표에 부여된 가중치는 향후 농업용 지하댐의 적지 선정에 유용할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사의 기본연구과제(C2016-0004-1) 지원으로 수행되었습니다.

References

- Affi, S. and Fuladipanah, M., 2015, Subsurface dam site selection using GIS (Case study: Chamsiab Plan, Masjedsoleyman, IRAN), *India. J. Funda. Appl. Life Sci.*, **5**(2), 566-571.
- Ali, S. S., Al-Umary, F. A., Salar, G. S., Al-Ansari, N., Knutson, S., 2014, Evaluation of selected site location for subsurface dam construction within Isayi watershed using GIS and RS Garmiyian Area, Kurdistan Region, *J. Water Res. Protec.*, **6**(11), 972-987.
- Ali Jamali, I., Mörtberg, U., Olofsson, B., Shafique, M., 2014, A spatial multi-criteria analysis approach for locating suitable sites for construction of subsurface dams in Northern Pakistan, *Water Res. Manage.*, **28**(14), 5157-5174.
- Barkhordari, J., 2015, The pre-selection of suitable sites for small underground dams in arid areas using GIS (A case study in Yazd_Ardakan watershed), *Int. Geoinform. Res. Develop. J.*, **6**(1), 18-27.
- Dorfeshan, F., Heidarnejad, M., Bordbar, A., Daneshian, H., 2014, Locating suitable sites for construction of underground dams through analytic hierarchy process, *International Conference on Earth, Environment and Life sciences (EELS-2014)* Dec. 23-24, 2014 Dubai (UAE), 86-90.
- Kim, S.M., Lee, S.I., Kim, B.C., 2004, Effective use of water resources through conjunctive use(II) Application, *J. Korea Water Res. Assoc.*, **37**(10), 799-812.
- Lee, S.I., Kim, B.C., 2003, Site suitability analysis for underground dam using analytic hierarchy process, *J. Soil Groundw. Environ.*, **8**(4), 36-44.
- Lee, S.I., Kim, B.C., Kim, S.M., 2004, Effective use of water resources through conjunctive use(I) The methodology, *J. Korea Water Res. Assoc.*, **37**(10), 789-798.
- Lee, S.I., Lee, S.S., 2004, Development of site analysis system for conjunctive use of surface and ground water, *Korea Water Resources Association Convention* 14-15, May, 2004, 878-882.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs), 2014, 10-year plan on rural water development (2015-2024).
- MICT (Ministry of Construction and Transportation), KWRC (Korea Water Resources Corporation), 2002, Investigation report for development plan of subsurface dam.
- Park, E.G., 2017, Development of optimum subsurface dam evaluation factor to secure groundwater for drought management, 2017 Conference of Soil and Groundwater Environment 19-20, October, 2017, Jeju, Korea.
- Saaty, T., 1977, A scaling method for priorities in hierarchical structures, *J. Math. Psych.*, **15**(3), 234-281.
- Saaty, T., 1980, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York.
- Sehat, M., Kamanbedast A. A., Asdiloir, M., 2013, Zonning underground dams using GIS in Halayjan valley, Izeh-Iran, *Tech. J. Eng. and Appl. Sci.*, **3**, 3752-3756.
- Yong, H.H., Song, S.H., Myoung, W.H., An, J.G., Hong, S.W., 2017, Current satus and applications of agricultural subsurface dams in Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **22**(1), 18-26.