

영향요인을 고려한 댐 용수공급능력 추정 회귀모형

Multiple Regression Equations for Estimating Water Supply Capacities of Dams Considering Influencing Factors

강 민 구* / 이 광 만**

Kang, Min Goo / Lee, Gwang Man

Abstract

In this study, factors that influence water supply capacities of dams are extracted using factor analysis, and multiple regression equations for estimating water supply capacities of dams are developed using the analysis results. Twenty-one multi-purpose dams and twelve Municipal and Industrial (M&I) water supply dams are selected for case studies, and eight variables influencing water supply capacities of dams, namely: watershed area, inflow, effective reservoir storage, grade on amount of M&I water supply, grade on amount of agricultural water supply, grade on amount of in-stream flow supply, grade on river administration, and grade on average rainfall, are determined. Two case studies for multi-purpose dams and M&I water supply dams are performed, employing factor analysis, respectively. For the two cases, preliminary tests, such as reviewing matrix of correlation coefficient, Bartlett's test of sphericity, and Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test, are conducted to evaluate the suitability of the variables for factor analysis. In case of multi-purpose dams, variables are grouped into three factors; M&I water supply dams, two factors. The factors are rotated using Varimax method, and then factor loading of each variable is computed. The results show that the variables influencing water supply capacities of dams are reasonably selected and appropriately grouped into factors. In addition, multiple regression equations for predicting the amounts of annual water supply of dams are established using the factor scores as explanatory variables, it is identified that the models' accuracies are high, and their applications to determining effective storage capacity of a dam during dam planning and design steps are presented. Consequently, it is thought that the variables and factors are useful for dam planning and dam design.

Keywords : factor analysis, water supply capacity, multiple regression equation, dam planning and design

요 지

본 연구에서는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 요인들을 요인분석 통계기법을 사용하여 추출하였으며, 그 결과를 이용하여 댐 용수공급능력 추정을 위한 다중회귀모형을 개발하였다. 21개 다목적댐과 12개 생공용수전용댐을 대상으로 하였으며, 다목적댐과 생공용수전용댐으로 구분하여 요인분석을 수행하였다. 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 변수로 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급, 하천관리 등급, 평균강우량 등급을 선정하였다. 변수들의 상관계수 행렬 점검, Bartlett의 구형성 점검, KMO 표본적합도 점검을 실시하여 변수들의 요인분석에 대한 적합성을 확인하였다. 변수들은 다목적댐의 경우 3개 요인, 생공용수전용댐의 경우 2개 요인으로 분류되었으며, 요인들

* 미래자원연구원, 연구위원 (e-mail: kmg1218@gmail.com)

Research Fellow, Future Resources Institute, Woolim Lions Valley C-405, 371-28 Gasan-dong, Keumcheon-gu, Seoul 153-786, Korea

** 교신저자, Kwater Kwater연구원, 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr, Tel: 042-870-7420)

Corresponding Author; Head Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (Kwater), Daejeon 305-730, Korea

을 Varimax법을 사용하여 회전시켰다. 요인분석 결과는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 변수들이 합리적으로 선정되었고, 이들이 요인으로 적절하게 분류되었음을 보여주었다. 요인점수를 설명변수로 사용하여 연간용수공급량을 추정할 수 있는 다중회귀모형을 개발하였으며, 개발된 모형의 정확성을 평가하고 적용방법을 제시하였다. 결론적으로 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 것으로 파악된 변수 및 요인은 댐 계획 및 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 요인분석, 용수공급능력, 다중회귀모형, 댐 계획 및 설계

1. 서 론

댐 계획 및 설계 시 용수공급능력은 유입량, 저수용량, 수요량 등을 고려하여 개략적으로 결정된다. 보다 상세한 용수공급능력은 기준갈수년이나 장기수문자료에 대한 용수공급의 안정성을 평가하여 보장공급량이나 신뢰도 등과 같은 지표들로 제시된다. 댐의 용수공급능력 결정 과정은 사회-경제적 영향을 받으며, 사회적 갈등의 원인이 되기도 한다. 특히 남강댐 여유용량 배분과 같은 수자원 편익에 대한 지자체들 사이의 갈등은 댐의 용수공급능력 및 용량배분 결정에 중대한 영향을 미치고 있다. 또한 댐에서 공급하는 하천유지유량은 하류 생태계에 미치는 영향이 크기 때문에 용수공급능력 결정시 댐의 환경적 중요성을 신중히 고려해야 한다. 따라서 효과적인 댐 계획 및 설계를 위해서는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 정량적인 변수들뿐만 아니라 사회-경제적 및 환경적 영향과 같은 정성적 변수들도 고려할 필요가 있다.

최근 통계적 분석기법의 개발, 혁신적인 컴퓨터 성능 향상 등으로 과거 보다 효율적인 자료분석이 가능해지고 있다. 국내의 댐 설계 및 운영 분야에서도 수문자료의 양적 증가와 분석기술의 발전으로 인해 관련 변수들의 체계적인 분석이 가능해지고 있으며, 다목적댐의 운영에 대한 영향요인이 요인분석을 통해서 추출된 바가 있다(강민구 등, 2007). 요인분석은 데이터양의 축소와 정보 요약, 변수들 내부에 존재하는 구조 발견, 중요도가 낮은 변수 제거 등에 적용되고 있다(Iyer and Jha, 2006; Nandagiri and Kovoov, 2006). 따라서 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 변수 선정과 영향요인 추출에 요인분석의 적용이 가능하다.

요인분석을 정량적 변수들의 분류에 적용한 연구결과들을 살펴보면, 남우성 등(2008)이 강우에 영향을 미치는 21개 변수들을 5개 요인으로 분류한 바가 있으며, 윤혜선 등(2009)이 제주도 강수량에 영향을 미치는 4개 지형변수를 동일한 요인으로 분류한 바가 있다. 또한 유지영 등(2010)은 국내 가뭄 특성과 관련된 48개의 변수를 7개의 요인으로 분류한 바가 있으며, 김현지 등(2009)은 해안지

역의 지하수 특성과 관련된 변수들을 4개의 요인으로 분류한 바가 있다. 요인분석을 정성적 변수의 분류에 적용한 연구결과들을 살펴보면, 염성진과 박정인(2011)이 2개 지역에서 설문조사를 통해 얻은 공원녹지의 만족도와 관련된 16개 변수를 5개 요인으로 분류하였으며, 김호기와 권순욱(2011)은 설문조사를 통하여 수집한 U-City 사업의 계획단계 리스크에 영향을 미치는 52개 변수를 12개 요인으로 분류하였다. 이들 연구결과와 같이 요인분석은 정량적 변수뿐만 아니라 정성적 변수를 요인들로 분류하는데 적용이 되고 있다.

일반적으로 모형의 예측능력은 많은 영향요인들을 고려할수록 예측정확도가 높아지며, 최근에는 정성적인 변수를 사용하는 예측 모형들이 개발되고 있다(지성민 등, 2012). 따라서 댐 용수공급능력 추정에 유역면적, 유효저수량, 유입량 등과 같은 정량적인 변수들뿐만 아니라 댐의 사회-경제적 중요성, 환경적 중요성 등과 같은 정성적인 변수들을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 댐 계획 및 설계 시 개략적인 용수공급능력을 결정하기 위하여 관련 변수들을 선정하고 요인을 추출하며, 요인들의 요인점수를 설명변수로 사용하는 다중회귀모형을 개발하고자 하였다. 이를 위해 다목적댐과 생공용수전용댐의 용수공급능력에 영향을 미치는 변수들을 선정하고 이들을 요인분석을 통하여 2~3개의 요인으로 분류하였다. 또한 요인분석결과를 이용하여 연간용수공급량을 추정할 수 있는 다중회귀모형을 개발하였으며, 다목적댐과 생공용수전용댐 계획 및 설계 시 유효저수량 결정에 개발된 모형의 적용방법을 제시하였다.

2. 요인분석(Factor Analysis)

2.1 개요

요인분석은 상관성이 높은 일부 변수들이 서로 같은 분산구조를 가지고 있는가를 검토하여 이들을 동일 요인으로 분류하는 통계기법이며, 공통적인 성분을 공통요인, 독자적인 성분을 특수요인으로 구분한다. 요인분석에서는

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 와 같이 p개의 변수들로 구성된 벡터 X의 표준화된 변수들로 구성된 벡터 Z가 Eq. (1)과 같이 공통 요인 F와 특수요인 U의 선형결합으로 표현이 가능하다고 가정한다.

$$Z = A \cdot F + U \quad (1)$$

여기서, $Z = [z_1, z_2, \dots, z_p]'$, $F = [f_1, f_2, \dots, f_q]'$, $U = [u_1, u_2, \dots, u_p]'$ 이며, []'는 행렬을 전환한 것임을 나타낸다. 행렬 A는 $p \times q$ 행렬로 요인부하량(factor loading)을 나타낸다.

요인분석에서는 공통요인은 서로 독립적이고 평균이 0이며 분산이 1인 정규분포를 나타내는 것으로 가정한다. 또한 특수요인은 서로 독립적이고 평균이 0이며 분산은 ψ_i 이며, 공통요인과 특수요인은 서로 독립적인 것으로 가정한다(강민구 등, 2008).

2.2 요인분석 절차

요인분석을 수행하기 위해서는 먼저 자료가 요인분석에 적합한가를 평가해야 하며, Bartlett의 구형성 점검, 상관계수 행렬 점검, 고유값 점검, 공통인자분석 점검, 잔영상관행렬 점검, KMO 표본적합도 점검 등이 적용된다. 이 중에서 Bartlett의 단위행렬 점검과 KMO 표본적합도 점검이 대표적인 방법이다. Bartlett의 단위행렬 점검은 요인분석에 사용되는 변수들의 상관행렬이 단위행렬인가를 점검하여 변수들이 상호 독립적인가를 판단하는 방법이다. 만일 모집단 내에서 변수들이 상호 독립적이면 추출된 표본에서 변수들의 상관관계도 0에 가까워 요인분석의 적용이 어렵다. Bartlett의 단위행렬 점검에서는 정해진 유의수준 내에서 변수들의 상관행렬이 단위행렬이 아님을 통계적으로 증명하여 변수들의 요인분석에 대한 적합성을 평가한다. KMO 표본적합도 점검은 잔영상관행렬을 사용하여 계산된 통계량인 MSA (KMO Measures of Sampling Adequacy)를 이용하여 변수들이 요인분석에 적합한가를 판정하는 방법이다. 잔영상관행렬은 각 변수들 사이의 요인공통분산을 제거한 후 변수 고유분산과 잔차 분산으로만 계산된 상관계수 행렬이며, MSA는 Eq. (2)와 같이 계산한다.

$$MSA = \frac{\sum_{m \neq n} r_{mn}^2}{\sum_{m \neq n} r_{mn}^2 + \sum_{m \neq n} q_{mn}^2} \quad (2)$$

여기서, q_{mn}^2 는 잔영상관행렬의 비대각선에 있는 계수의 제곱, r_{mn}^2 는 원래 상관행렬의 비대각선에 있는 계수의 제

곱을 나타낸다. 일반적으로 MSA 값이 0.4 이상인 자료에 요인분석의 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

두 번째, 변수와 요인의 상관관계를 나타내는 최초 요인행렬을 추출하고 회전시키지 않은 요인행렬로부터 몇 개의 요인을 추출할 것인가를 결정한다. 세 번째, 요인공통분산을 기준으로 요인의 특성을 가장 잘 나타내는 변수들의 조합을 찾고, 변수들의 요인부하량을 추정한다.

네 번째, 변수들의 요인부하량이 한 요인에 최대가 되고 다른 요인에는 최소가 되도록 하기 위하여 요인들을 회전시킨다. 요인 회전 방법은 직각회전과 사각회전으로 구분되며, 본 연구에서는 직각회전 방식을 사용하였다. 직각회전방식은 회전축이 직각이 되도록 회전하므로 요인들 사이의 상관계수가 0이 되며, 요인들 사이의 관계가 서로 독립적이 된다. 특히 가장 널리 사용되는 Varimax법은 요인행렬 내 각 열의 요인부하량을 제곱한 값들의 분산을 최대화시키면서 요인들 사이의 상관계수가 0이 되도록 한다. 따라서 회전된 요인들의 요인점수를 회귀모형의 설명 변수로 사용하면 변수들 사이의 독립성을 확보할 수 있기 때문에 변수들의 다중공선성을 피할 수 있다(강민구 등, 2007; 강민구 등, 2008).

마지막으로 회전된 요인에 대한 변수들의 요인부하량을 산정하고 요인들의 요인점수를 산정한다. 요인점수는 추출된 요인들에 대하여 각각 Eq. (3)과 같이 산정되며, 변수들의 표준화된 값과 가중치의 선형결합으로 표현된다.

$$FS_j = \sum_{i=1}^m W_{ji} ST_i \quad (3)$$

여기서, FS_j 는 추출된 요인 j 의 요인점수, m 는 변수의 개수, W_{ji} 는 요인 j 에 대한 변수 i 의 가중치를 나타낸다. ST_i 는 변수 i 의 표준화된 값이며, Eq. (4)와 같이 산정된다.

$$ST_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma_i} \quad (4)$$

여기서, x_i 는 변수 i 의 실제 값, \bar{x} 는 변수 i 의 평균, σ_i 는 변수 i 의 표준편차를 나타낸다.

3. 댐 용수공급능력에 대한 영향요인 추출

3.1 댐 용수공급능력에 관련된 변수

댐 용수공급능력에 대한 영향요인을 추출하기 위하여 21개의 다목적댐(Table 1)과 12개 생공용수전용댐(Table 2)을 선정하였다. 대상 댐들의 자료는 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS), 댐운영실무편람, 기존댐 용수공

Table 1. Characteristics of Selected Multi-purpose Dams

Name of dam	River		Watershed area (km ²)	Effective reservoir storage (10 ⁶ m ³)	Annual inflow (10 ⁶ m ³)	Average rainfall (mm)	Annual water supply (10 ⁶ m ³)
	Name	Administration category					
Chungju	Han	Nat.	6,648.00	1,789.00	5,108.83	1,197.60	3,380.00
Soyanggang	Soyang	Nat.	2,703.00	1,900.00	1,750.25	1,100.00	1,213.00
Hwengsong	Seom	Nat.	209.00	73.40	160.83	1,320.00	119.50
Andong	Nakdong	Nat.	1,584.00	1,000.00	851.47	950.00	926.00
Imha	Banbyeon	Nat.	1,361.00	424.00	756.90	987.10	591.60
Seongdeog	Bohyeon	2nd	41.30	21.90	24.28	1,043.30	20.60
Youngju	Naeseong	1st	500.00	160.40	316.62	1,137.00	203.30
Kunwi	Wi	2nd	87.50	40.10	50.77	1,021.00	38.30
Buhang	Buhang	2nd	82.00	42.60	52.03	1,127.00	36.30
Bohyeonsan	Kohyeon	2nd	32.60	17.90	18.61	1,007.70	14.87
Hapcheon	Hwang	Nat.	925.00	560.00	911.39	1,249.10	599.00
Namgang	Nam	Nat.	2,285.00	299.70	2,030.92	1,416.80	573.30
Milyang	Danjang	2nd	95.40	69.80	91.45	1,269.50	73.00
Yongdam	Keum	Nat.	930.00	672.50	769.48	1,259.70	650.50
Daechong	Keum	Nat.	4,134.00	790.00	3,216.67	1,230.00	1,649.00
Boryeng	Eungcheon	2nd	163.60	108.70	125.51	1,245.00	106.60
Buan	Jikso	2nd	59.00	35.60	39.50	1,271.90	35.10
Seomjingang	Seomjin	Nat.	763.00	370.00	545.57	1,310.20	414.20
Juam(main)	Boseong	Nat.	1,010.00	352.00	788.40	1,530.00	270.10
Juam(aux.)	Yisa	2nd	134.60	210.00	148.22	1,620.00	218.70
Jangheung	Tamjin	Nat.	193.00	171.00	157.68	1,507.00	127.80

Nat.: National river; 1st: First-ranked regional river; 2nd: Second-ranked regional river.

급능력조사 보고서 등을 이용하여 수집하였다. 선정된 자료 항목은 유역면적, 유효저수량, 평균유입량, 평균강우량, 생공용수공급량, 농업용수공급량, 하천유지유량공급량, 발전량, 홍수조절용량, 소재하천의 관리분류 등이다. Tables 1 and 2에서와 같이 수집된 자료들은 각 항목에 대하여 넓게 분포하고 있기 때문에 다양한 특성을 갖는 댐들이 분석에 포함된 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 댐 용수공급능력에 대한 사회-경제적 영향, 생태-환경적 영향은 정성적인 요인이기 때문에 이를 반영하기 위하여 생공용수공급량, 농업용수공급량, 하천유지유량공급량, 하천관리 분류를 Table 3과 같이 구간별로 등급을 부여하여 상대적인 크기를 갖도록 하여 대리 변수로 사용하였다. 이들 변수들은 댐의 사회-경제적 및 환경적 중요도를 간접적으로 나타내도록 하였으며, 각 변수들을 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급, 하천관리 등급으로 명명하였다. 각 댐들의 설계에

사용된 평균강우량은 강우량의 다소를 나타내기 위하여 Table 3과 같이 구분하였으며, 평균강우량 등급이라고 명명하였다. 최종적으로 요인분석에 대한 적합성 검토에 사용된 변수는 8개이며, 유역면적, 평균유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급, 하천관리 등급, 평균강우량 등급이다.

3.2 변수의 적합성 검토

8개 변수들의 요인분석에 대한 적합성을 점검하기 위하여 상관계수 행렬, Bartlett의 구형성, KMO 표본적합도 등을 점검하였다. 변수들 사이의 통계적 특성을 고려하여 선정된 8개의 변수들 사이의 상관계수 행렬은 Tables 4 and 5와 같이 다목적댐과 생공용수전용댐으로 구분하여 작성하였다. 이들 표에 제시된 것과 같이 변수들이 특정 변수들과 높은 상관관계를 나타내고 다른 변수들과는 낮은 상관관계를 나타냈으며, 이는 변수들이 공통요인으로

Table 2. Characteristics of Selected M&I Water Supply Dams

Name of dam	River		Watershed area (km ²)	Effective reservoir storage (10 ⁶ m ³)	Annual inflow (10 ⁶ m ³)	Average rainfall (mm)	Annual water supply (10 ⁶ m ³)
	Name	Administration category					
Kwangdong	Golgi	2nd	125.00	8.00	58.80	1,130.00	26.40
Dalbang	Jeon	2nd	29.40	7.50	21.76	1,213.70	14.60
Youngcheon	Jaho	2nd	235.00	81.40	122.68	1,100.00	107.30
Woonmun	Dongchang	2nd	301.30	126.20	201.83	1,139.40	167.90
Sayeon	Daegok	2nd	124.50	20.00	91.45	1,153.00	80.41
Daeam	Dungi	2nd	77.00	5.00	47.93	1,203.00	18.25
Daegok	Daegok	2nd	57.50	27.80	41.00	1,251.00	32.90
Kampo	Ohryu	Local	3.70	2.20	2.05	1,010.00	1.60
Yeoncho	Yeoncho	2nd	11.70	4.60	8.51	1,367.60	6.20
Kucheon	Kucheon	2nd	12.70	9.30	10.41	1,500.30	7.50
Sueo	Sueo	2nd	49.00	22.00	45.10	1,550.00	29.70
Pyengrim	Pyengrim	2nd	19.90	8.10	14.19	1,339.00	11.80

2nd: Second-ranked regional river; Local: Local stream.

Table 3. Criteria for Evaluating Dams' Weights from the Perspectives of Water Supply, River Administration, and Average Rainfall

M&I water supply		Agricultural water supply		In-stream flow supply		River administration		Average rainfall	
Range (10 ⁶ m ³)	Grade	Range (10 ⁶ m ³)	Grade	Range (10 ⁶ m ³)	Grade	Category	Grade	Range (mm)	Grade
MI ≥ 1000	100	AG ≥ 100	100	IF ≥ 100	100	Nat.	100	RF ≥ 1,500	100
MI ≥ 500	80	AG ≥ 50	80	IF ≥ 50	80	1st	80	RF ≥ 1,300	80
MI ≥ 100	50	AG ≥ 10	50	IF ≥ 10	50	2nd	50	RF ≥ 1,100	50
MI ≥ 50	30	AG ≥ 5	30	IF ≥ 5	30	Local	30	RF ≥ 1,000	30
MI ≥ 10	20	AG ≥ 1	20	IF ≥ 1	20			RF ≥ 950	20
MI ≥ 5	10	AG ≥ 0.5	10	IF ≥ 0.5	10			RF ≥ 900	10
MI < 5	5	AG < 0.5	5	IF < 0.5	5			RF < 900	5

Table 4. Results of Correlation Analysis between Variables Influencing on Water Supply Capacities of Multi-purpose Dams

Variable	Var_1-M	Var_2-M	Var_3-M	Var_4-M	Var_5-M	Var_6-M	Var_7-M	Var_8-M
Var_1-M	1.000	.993	.820	.813	.285	.536	-.077	.649
Var_2-M	.993	1.000	.774	.805	.279	.522	-.025	.642
Var_3-M	.820	.774	1.000	.839	.214	.570	-.138	.485
Var_4-M	.813	.805	.839	1.000	.094	.608	.058	.476
Var_5-M	.285	.279	.214	.094	1.000	.533	-.029	.286
Var_6-M	.536	.522	.570	.608	.533	1.000	.237	.496
Var_7-M	-.077	-.025	-.138	.058	-.029	.237	1.000	.035
Var_8-M	.649	.642	.485	.476	.286	.496	.035	1.000

Var_1-M: Watershed area; Var_2-M: Inflow; Var_3-M: Effective reservoir storage; Var_4-M: Grade on amount of M&I water supply; Var_5-M: Grade on amount of in-stream flow supply; Var_6-M: Grade on river administration; Var_7-M: Grade on average rainfall; Var_8-M: Grade on amount of agricultural water supply

분류될 수 있음을 의미한다. 다목적댐 용수공급능력에 관련된 8개 변수에 대한 Bartlett의 구형성 점검 결과, 근사카이제곱은 160.4, 자유도 28, 유의확률 0.000으로 유의수준 0.01에서도 단위행렬이 아니라는 충분한 증거를 보여주기 때문에 요인분석의 적용이 가능한 것으로 평가되었다. 또한 생공용수전용댐 용수공급능력에 관련된 8개 변수에 대한 Bartlett의 구형성 점검 결과, 근사카이제곱은 113.7, 자유도 28, 유의확률 0.000으로 유의수준 0.01에서도 단위행렬이 아니라는 충분한 증거를 보여주기 때문에 요인분석을 적용하는데 무리가 없는 것으로 평가되었다. KMO 표본적합도 점검을 통해서 다목적댐 용수공급능력에 관련된 8개 변수에 대한 MSA가 0.66인 것으로 나타났으며, 선정된 변수들이 요인분석에 적합한 자료로 판정되었다. 생공용수전용댐 용수공급능력에 관련된 8개 변수에 대한 MSA는 0.58로 나타났으며, 선정된 변수들이 요인분석에 적합한 자료인 것으로 평가되었다.

3.3 요인수 결정

본 연구에서는 선정된 변수들에 의해 나타나는 요인들의 고유값과 분산을 비교하여 적절한 요인수를 선정하였

다. Table 6은 다목적댐과 생공용수전용댐의 변수들을 각각 요인분석하여 추출된 요인들의 고유값, 요인공통분산, 누적요인공통분산의 총분산에 대한 비율을 나타낸 것이다. 다목적댐의 경우 고유값이 1.0 이상인 요인들만 고려하였으며, 요인수는 3개가 선정되었고 이들의 누적요인공통분산은 총분산의 84.3%이었다. 생공용수전용댐의 경우 고유값이 1.0 이상인 요인들만 고려하였으며, 요인수는 2개가 선정되었고 이들의 누적요인공통분산은 총분산의 81.9%이었다. 다목적댐과 생공용수전용댐의 용수공급능력에 대한 영향요인수는 각각 3개와 2개가 선정되었으며, 두 경우 모두 누적요인공통분산이 일반적으로 적용되는 기준인 60%를 각각 상회하여 적절한 요인수가 결정된 것으로 판단된다.

3.4 요인 회전

요인분석에서는 변수들이 여러 요인에 대하여 유사한 요인부하량을 나타낼 경우 어느 요인에 속하는가를 분류하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여 변수의 요인부하량인 한 요인에 최대가 되고 다른 요인에는 최소가 되도록 요인을 회전시킨다. 본 연구에서는 회전축이 직각이 되도록

Table 5. Results of Correlation Analysis between Variables Influencing on Water Supply Capacities of M&I Water Supply Dams

Variable	Var_1-S	Var_2-S	Var_3-S	Var_4-S	Var_5-S	Var_6-S	Var_7-S	Var_8-S
Var_1-S	1.000	.979	.912	.883	-.351	.939	.515	.277
Var_2-S	.979	1.000	.929	.846	-.301	.979	.393	.288
Var_3-S	.912	.929	1.000	.942	-.197	.897	.491	.204
Var_4-S	.883	.846	.942	1.000	-.241	.808	.704	.143
Var_5-S	-.351	-.301	-.197	-.241	1.000	-.304	-.132	.443
Var_6-S	.939	.979	.897	.808	-.304	1.000	.363	.300
Var_7-S	.515	.393	.491	.704	-.132	.363	1.000	.106
Var_8-S	.277	.288	.204	.143	.443	.300	.106	1.000

Var_1-S: Watershed area; Var_2-S: Inflow; Var_3-S: Effective reservoir storage; Var_4-S: Grade on amount of in-stream flow supply; Var_5-S: Grade on amount of average rainfall; Var_6-S: Grade on amount of M&I water supply; Var_7-S: Grade on amount of agricultural water supply; Var_8-S: Grade on river administration

Table 6. Eigen Values, Variances, and Accumulated Variances, Varying with Extracted Factors Influencing Water Supply Capacities and Dam Categories

Category	Factor	Eigen value	Variance (%)	Accum. variance (%)
Multi-purpose dam	1	4.521	56.509	56.509
	2	1.205	15.066	71.576
	3	1.018	12.721	84.297
M&I water supply dam	1	5.109	63.867	63.867
	2	1.446	18.076	81.943

회전하는 직각회전 방법 중의 하나인 Varimax법을 사용하였다. Table 7은 다목적댐과 생공용수전용댐의 용수공급능력에 대한 영향요인의 회전결과를 나타낸 것이다. 다목적댐의 경우, 요인 1에는 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급과 같은 5개의 변수가 포함되며 요인부하량은 0.637~0.944의 범위를 나타냈다. 요인 2에는 하천유지유량 등급, 하천관리 등급과 같은 2개의 변수가 포함되며 요인부하량은 0.616~0.960의 범위를 나타냈다. 요인 3에는 평균강우량 등급과 같은 1개의 변수가 포함되며 요인부하량은 0.979를 나타냈다. 생공용수전용댐 용수공급능력에 대한 영향요인의 회전결과를 살펴보면, 요인 1에는 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 하천유지유량 등급, 농업용수량 등급 등과 같은 5개의 변수가 포함되며, 요인부하량은 0.591~0.980의 범위를 나타냈다. 요인 2에는 하천관리 등급과 평균강우량 등급과 같은 2개의 변수가 포함되며 요인부하량은 0.838~0.860의 범위를 나타냈다. 다목적댐과 생공용수전용댐의 요인분석결과를 비교해 보면, 다목적댐의 경우 댐의 규모나 댐에 소재한 하천의 중요도에 따라 하천유지유량이 결정되기 때문에 하천유지유량 등급 변수와 하천관리 등급 변수가 요인 2로 분류되었으며, 이들이 용수공급능력에 미치는 영향은 평균강우량 등급 변수를 포함하는 요인 3과 같이 요인 1보다 작은 것으로 나타났다. 이와 달리 생공용수전용댐의 경우에는 달방댐, 영천댐, 운문댐, 평림댐, 사연댐을 제외한 나머지 댐들이 하천유지유량을 공급하지 않기 때문에 하천유지유량 등급 변수가 요인 1로 분류되었다. 또한 감포댐을 제외한 나머지 댐들이 지방 2급 하천으로 분류되어 관리되고 있기 때문에 하천관리 등급 변수는 평균강우량 등급 변수와 함께 요인 2로 분류되었으며, 용수공급능력에 미치는 영향이 요인 1보다 작은 것으로 나타났다.

3.5 요인분석 결과 고찰

본 연구에서는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 요인들을 추출하기 위하여 댐 용수공급능력 결정에 영향을 미치는 8개의 변수들을 선정하였다. 이들 변수들 중에서 유역면적, 유입량, 유효저수량은 댐 저수량에 직접적으로 영향을 미치는 정량적인 변수이다. 요인분석결과를 살펴보면, 다목적댐의 경우에 세 변수는 요인들 중 가장 큰 영향력을 나타내는 제1요인으로 분류되었으며, 요인부하량이 0.895~0.944로 높은 값을 나타냈다. 생공용수전용댐의 경우에도 세 변수는 요인들 중 가장 큰 영향력을 나타내는 제1요인으로 분류되었으며, 요인부하량이 0.957~0.980로 높은 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 유역면적, 유입량, 유효저수량이 댐 용수공급능력에 직접적인 영향을 미치는 정량적인 변수라는 것을 의미한다. 강우량은 유입량에 영향을 미치므로 댐의 용수공급능력과 관련이 있는 정량적 변수이다. 그러나 댐 상류 강우량은 시·공간적인 변동성이 크기 때문에 개략적인 댐 용수공급능력을 평가하는 과정에는 직접적으로 사용이 어렵기 때문에 평균강우량의 대소를 상대적으로 비교하는 평균강우량 분류를 변수로 사용하였다. 요인분석 결과를 살펴보면, 다목적댐의 경우에 평균강우량 분류는 다른 요인들 보다 영향력이 작은 제3요인으로 분류되었으며, 이는 다목적댐의 용수공급능력에 평균강우량이 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 생공용수전용댐의 경우에도 평균강우량은 다른 요인들 보다 영향력이 작은 제2요인으로 분류되었으며, 이는 다목적댐의 경우와 같이 생공용수전용댐의 용수공급능력에 평균강우량이 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다.

댐 용수공급능력은 사회-경제 및 환경으로부터 영향을 받으며, 댐 계획 및 설계 시 이를 고려하여 용수공급능력이 결정된다. 본 연구에서는 댐 용수공급능력에 대한 사회-

Table 7. Variables' Factor Loadings according to Rotated Factors, Varying with Dam Categories

Variable	Multi-purpose Dam			M&I water supply dam	
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2
Watershed area	.944	.187	-.072	.980	-.024
Inflow	.930	.178	-.024	.967	.016
Effective reservoir storage	.895	.122	-.104	.957	.021
Grade on amount of M&I water supply	.924	.006	.132	.944	.024
Grade on amount of in-stream flow supply	.078	.960	-.074	.943	-.050
Grade on river administration	.544	.616	.346	.276	.860
Grade on average rainfall	-.045	.007	.979	-.305	.838
Grade on amount of agricultural water supply	.637	.347	.069	.591	-.028

경제적 및 환경적 영향을 고려하기 위하여 용수이용목적별 공급량을 사용하여 댐의 사회-경제적, 환경적 중요성을 간접적으로 나타내도록 하였다. 댐의 생공용수공급량, 농업용수공급량, 하천유지유량을 다른 댐들과 상대적으로 비교하여 댐 용수공급의 중요성을 나타냈다. 또한 댐이 위치한 하천의 관리등급을 이용하여 댐의 중요성을 간접적으로 나타냈다. 요인분석 결과를 살펴보면, 다목적댐의 경우에 생공용수량 등급과 농업용수량 등급이 가장 큰 영향력을 나타내는 제1요인으로 분류되었으며, 요인부하량이 각각 0.924와 0.637을 나타냈다. 이와 같은 결과는 다목적댐의 용수공급능력에 두 변수가 미치는 영향이 크다는 것을 나타내며, 다목적댐의 용수공급능력이 하천유지유량보다 생공용수공급량과 농업용수공급량으로부터 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 하천유지유량 등급 및 하천관리 등급은 제2요인으로 분류되었으며, 이는 다른 변수들 보다 댐 용수공급능력 결정에 미치는 영향이 작다는 것을 의미한다. 생공용수전용댐의 경우에 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급이 가장 큰 영향력을 나타내는 제1요인으로 분류되었으며, 요인부하량이 각각 0.944, 0.591, 0.943을 나타냈다. 하천관리 등급은 제 2 요인으로 분류되었으며, 이는 생공용수전용댐의 용수공급능력에 하천관리 등급 변수가 미치는 영향이 다른 변수들 보다 작다는 것을 의미한다.

4. 용수공급능력 예측을 위한 다중회귀모형 개발

4.1 요인점수 상관관계분석

요인분석을 통하여 추출된 요인들의 요인점수 사이의 상관분석은 다중회귀모형을 구성하는 설명변수들 사이의 상관관계를 파악하고 이들 사이의 다중공선성을 피하기 위하여 실시된다. 다목적댐 용수공급능력에 대한 영향요

인들의 요인점수들을 상관분석한 결과, 이들의 상관계수가 0.00이었다. Fig. 1(a)는 요인 1의 요인점수와 요인 2의 요인점수를 도식적으로 비교한 것이며, 이들 사이의 상관계수는 0.00이다. 생공용수전용댐 용수공급능력에 대한 영향요인들의 요인점수를 상관분석한 결과, 이들의 상관계수가 0.00이었다. Fig. 1(b)는 요인 1의 요인점수와 요인 2의 요인점수를 도식적으로 비교한 것이며, 이들 사이의 상관계수 0.00이다.

4.2 요인점수를 이용한 다중회귀모형

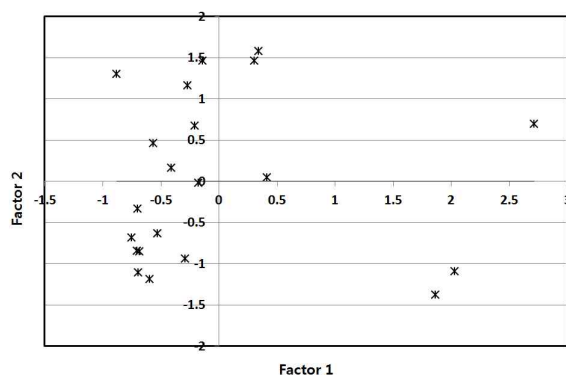
요인들의 요인점수(factor score)를 설명변수로 하고 설계용수공급량을 목표변수로 하는 다중회귀모형을 구성하여 예측한 결과와 각 댐의 설계용수공급량을 비교하였다. Eq. (5)는 다목적댐 용수공급능력에 대한 영향요인들의 요인점수를 설명변수로 사용하여 구성된 다중회귀모형이다.

$$WS_{MD} = aFS_1 + bFS_2 + cFS_3 + d \quad (5)$$

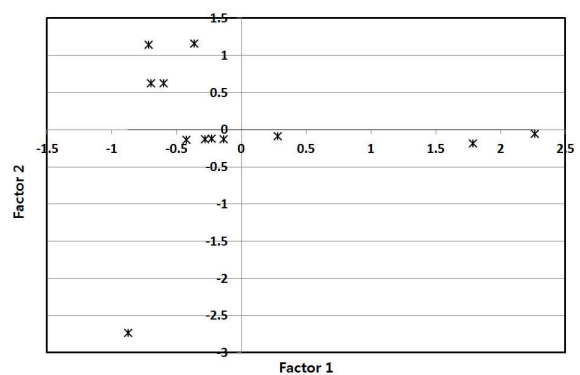
여기서, WS_{MD} 는 다목적댐 연간용수공급량($10^6 m^3$), FS_1, FS_2, FS_3 는 추출된 요인들의 요인점수, a, b, c 는 이들의 계수, d 는 상수를 나타낸다. 각 계수와 상수값은 Table 8에 제시되었다. 다중회귀모형은 모형의 정확성을 고려하여 연간용수공급량을 $WS_{MD} \geq 592 \times 10^6 m^3$ 과 $WS_{MD} < 592 \times 10^6 m^3$ 인 경우로 구분하여 개발되었으며, 각각의 경우에 실적치와 예측치의 상관계수가 0.998과 0.969이었으며, 높은 상관성을 나타냈다. Eq. (6)은 생공용수전용댐 용수공급능력에 대한 영향요인들의 요인점수를 설명변수로 사용하여 구성된 다중회귀모형이다.

$$WS_M = eFS_{11} + fFS_{12} + g \quad (6)$$

여기서, WS_M 는 생공용수전용댐 연간용수공급량($10^6 m^3$),



(a) Multi-purpose Dam



(b) M&I Water Supply Dam

Fig. 1. Correlation Analysis between Rotated Factors' Scores

FS_{1L} , FS_{2L} 는 추출된 요인들의 요인점수, e , f , g 는 이들의 계수, g 는 상수를 나타낸다. 각 계수와 상수값은 Table 8에 제시되었다. 다중회귀모형은 모형의 정확성을 고려하여 연간용수공급량을 $WS_{MI} \geq 28 \times 10^6 m^3$ 과 $WS_{MI} < 28 \times 10^6 m^3$ 인 경우로 구분하여 개발되었으며, 각각의 경우에 실적치와 예측치의 상관계수가 0.955와 0.986이었으며, 높은 상관성을 나타냈다.

Fig. 2는 개발된 다중회귀모형을 이용하여 예측한 다목적댐 연간용수공급량과 설계용수공급량을 비교한 것이다. 설계용수공급량과 예측값이 1:1 선상에 밀접하게 분포하고 있으며, 다중회귀모형의 정확도가 높다는 것을 나타낸다. Fig. 3은 다중회귀모형을 이용하여 예측한 생공용수전용댐의 연간용수공급량과 설계용수공급량을 비교한 것이다. 설계용수공급량과 예측값이 1:1 선상에 밀접하게 분포하고 있으며, 다중회귀모형의 정확도가 높다는 것을 나타낸다.

4.3 다중회귀모형의 적용

본 연구에서 개발한 다중회귀모형은 댐 계획 및 설계 시 댐의 용수공급능력을 개략적으로 추정하는데 활용될

수 있다. 8개 변수 중에서 유역면적, 평균유입량, 하천관리 등급, 평균강우량 등급은 댐 위치가 결정되면 수집이 가능하고, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급은 대략적인 용수공급량과 용수배분이 결정되면 추정할 수 있다. 이에 반하여 유효저수량은 댐의 용수공급능력에 따라 변하며, 댐 규모 결정에 영향을 미치는 설계변수이다. 따라서 댐 계획 및 설계 시 유효저수량은 용수공급량을 고려해서 결정해야 하며, 본 연구에서 개발한 다중회귀모형을 이용하면 용수공급량에 상응하는 유효저수량을 결정할 수 있다.

다목적댐의 경우에는 해당 댐에 대한 8개의 변수를 이용하여 Eq. (5)의 독립변수인 요인 1, 요인 2, 요인 3의 요인점수를 산정하고, 연간용수공급량을 추정한다. Fig. 4는 유역면적 $500.0 km^2$, 평균유입량 $300.0 \times 10^6 m^3$, 생공용수 $10 \leq MI < 50 \times 10^6 m^3$, 농업용수 $5 \leq AG < 10 \times 10^6 m^3$, 하천유지유량 $IF \geq 100 \times 10^6 m^3$, 하류하천 지방1급 하천, 평균강우량 $1,100 \leq RF < 1,300$ 인 다목적댐의 유효저수량 변화에 따른 연간용수공급량의 변화를 Eq. (5)를 이용하여 추정한 것이다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 유효저수량이 증가함에 따라 연간용수공급량은 증가하는 경향을 나타내

Table 8. Multiple Regression Equations Developed Using Scores of Extracted Factors as Explanatory Variables

Items	Annual water supply			
	Multi-purpose dam (WS_{MD} , $10^6 m^3$)		M&I water supply dam (WS_{MI} , $10^6 m^3$)	
	$WS_{MD} \geq 592$	$WS_{MD} < 592$	$WS_{MI} \geq 28$	$WS_{MI} < 28$
a (e)	1135.248	417.082	45.104	30.898
b (f)	776.977	105.084	-1.441	.202
c	577.145	-34.445		
d (g)	109.068	397.825	50.154	28.846

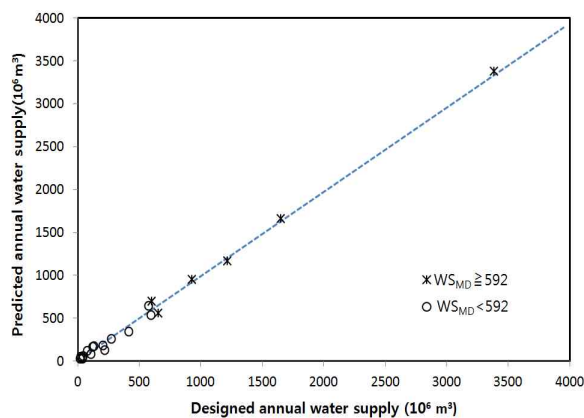


Fig. 2. Comparison of Designed and Predicted Amounts of Annual Water Supply for Multi-purpose Dams

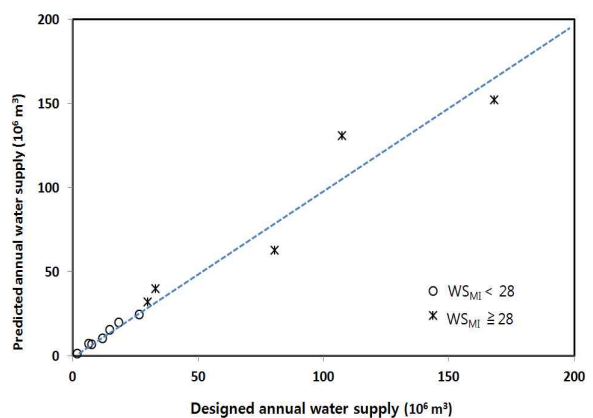


Fig. 3. Comparison of Designed and Predicted Amounts Annual Water Supply for M&I Water Supply Dams

며, 이와 같은 유효저수량과 연간용수공급량의 관계를 이용하여 해당 댐의 최적 규모를 개략적으로 결정할 수 있다.

생공용수전용댐의 경우에는 해당 댐의 8개 변수들을 이용하여 Eq. (6)의 독립변수인 요인 1, 요인 2의 요인점수를 산정하고, 연간용수공급량을 추정한다. Fig. 5는 유역면적 58.0km^2 , 평균유입량 $42.0 \times 10^6\text{m}^3$, 생공용수 $10 \leq \text{MI} < 50 \times 10^6\text{m}^3$, 농업용수 $\text{AG} < 5 \times 10^6\text{m}^3$, 하천유지유량 $\text{IF} < 0.5 \times 10^6\text{m}^3$, 하류하천 지방 2급 하천, 평균강우량 $1,100 \leq \text{RF} < 1,300$ 인 생공용수전용댐의 유효저수량변화에 따른 연간용수공급량의 변화를 Eq. (6)를 이용하여 추정하여 도시한 것이다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 유효저수량이 증가함에 따라 연간용수공급량은 증가하는 경향을 나타내며, 이와 같은 유효저수량과 연간용수공급량의 관계를 이용하여 해당 댐의 최적 규모를 개략적으로 결정할 수 있다.

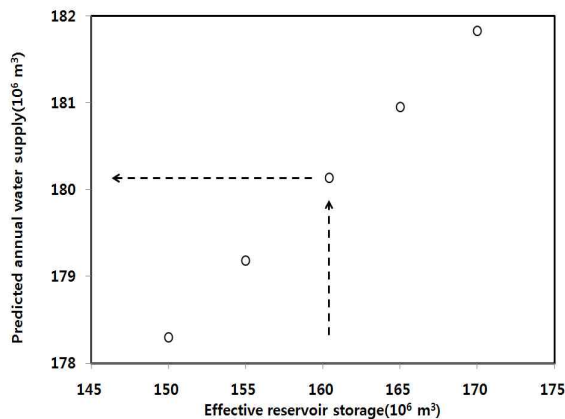


Fig. 4. Variation of Amount of Annual Water Supply of a Multi-purpose Dam According to Effective Reservoir Storages

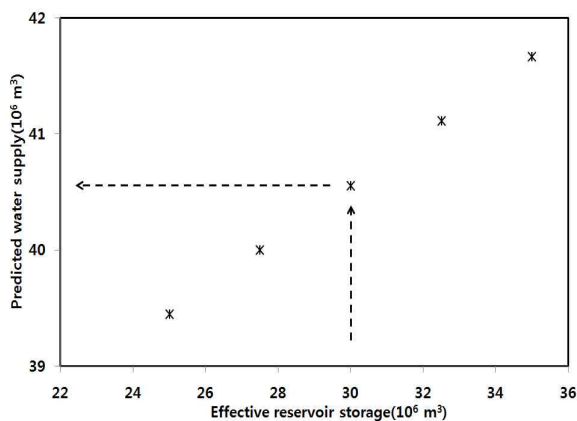


Fig. 5. Variation of Amount of Annual Water Supply of a M&I Water Supply Dam According to Effective Reservoir Storages

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 댐 용수공급능력에 영향을 미치는 요인들을 추출하기 위하여 33개 댐의 설계자료를 수집하고, 댐의 용수공급능력 결정에 정량적이거나 정성적으로 영향을 미치는 변수들을 선정하였다. 요인분석은 다목적댐과 생공용수전용댐으로 구분하여 적용하였으며, 각각에 대한 영향요인을 추출하였다. 요인분석결과의 적절성을 확인하기 위하여 변수들의 분류 결과를 고찰하였으며, 선정된 요인들의 요인점수를 설명변수로 사용하여 연간용수공급량을 예측할 수 있는 다중회귀모형을 개발하였으며, 개발된 모형의 적용방법을 제시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 요인분석에 적합한 변수로 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급, 하천관리 등급, 평균강우량 등급을 선정하였으며, 상관계수 행렬 점검, Bartlett의 구형성 점검, KMO 표본적합도 점검을 통하여 선정된 변수들이 요인분석에 적합한 자료인 것으로 평가되었다.
- 2) 다목적댐 용수공급능력에 관련된 변수들은 3가지 요인으로 분류되었으며, 요인 1에는 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 요인 2에는 하천유지유량 등급, 하천관리 등급, 요인 3에는 평균강우량 등급이 각각 포함되었다. 생공용수전용댐 용수공급능력에 관련 변수들은 2가지 요인으로 분류되었으며, 요인 1에는 유역면적, 유입량, 유효저수량, 생공용수량 등급, 농업용수량 등급, 하천유지유량 등급, 요인 2에는 하천관리 등급과 평균강우량 등급이 각각 포함되었다.
- 3) 추출된 요인들의 요인점수를 설명변수로 사용하여 댐 연간용수공급량을 예측하는 다중회귀모형을 다목적댐과 생공용수전용댐에 대하여 각각 개발하고 예측치와 설계용수공급량을 비교하여 모형의 정확도가 높다는 것을 확인하였으며, 댐 유효저수량 결정에 대한 모형의 적용성이 증명되었다.

본 연구에서 선정한 다목적댐 및 생공용수전용댐의 용수공급능력에 영향을 미치는 변수들은 요인분석을 통해서 적절하게 분류되었다고 판단된다. 댐의 용수공급능력에는 유역면적, 유효저수량, 유입량과 같은 정량적인 변수들이 주로 영향을 미치며 용수공급의 중요도와 소재하천의 중요도 등과 같은 정성적인 변수들의 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 그러나 댐 용수공급능력에 대한 사회-경제적 및 환경적 영향을 고려하기 위해서는 향

후 설계용수공급량 결정시 정성적인 변수의 영향을 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.

참고문헌

강민구, 이광만, 고익환, 정찬용 (2008). “요인분석을 이용한 수계 관리 맥락에서 유역관리 상태를 평가하기 위한 통합 지수 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제 41권, 제3호, pp. 277-291.

강민구, 정찬용, 이광만 (2007). “요인분석 통계기법을 이용한 댐 운영에 대한 영향 요인 추출.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제10호, pp. 769-781.

김현지, 함세영, 김남훈, 정재열, 이정환, 장성 (2009). “해수 침투와 농업활동에 의한 사천-하동 해안지역 지하수의 오염 특성.” **자원환경지질**, 대한자원환경지질학회, 제42권, 제6호, pp. 575-589.

김호기, 권순옥 (2011). “U-city사업 계획단계에서의 핵심 리스크 요인 도출.” **한국건설관리학회 논문집**, 한국건설관리학회, 제12권, 제4호, pp. 139-148.

남우성, 김태순, 신주영, 허준행 (2008). “다변량 분석 기법을 활용한 강우 지역빈도해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 517-525.

염성진, 박청인 (2011). “도시공원녹지의 구성과 배치 특성

에 따른 이용만족도에 관한 연구.” **한국조경학회지**, 한국조경학회, 제39권, 제5호, pp. 12-20.

유지영, 최민하, 김태웅 (2010). “군집분석을 이용한 우리나라 가뭄특성의 공간적 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제1호, pp. 15-24.

윤혜선, 엄명진, 조원철, 허준행 (2009). “산악형 강수의 지형학적 영향 요인 추출에 관한 연구.” **한국수자원학회 2009년 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 12-16.

지성민, 현창택, 문현석 (2012). “정성변수를 고려한 공공아파트 기획단계 공사비 예측 모델.” **한국건설관리학회 논문집**, 한국건설관리학회, 제13권, 제2호, pp. 91-101.

Iyer, K.C., and Jha, K.N. (2006). “Critical factors affecting schedule performance: Evidence from Indian construction projects.” *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 132, No. 8, pp. 871-881.

Nandagiri, L., and Kovoov, G. (2006). “Performance evaluation of reference evapotranspiration equation across a range Indian climate.” *Journal of Irrigation and Drainage*, ASCE, Vol. 132, No. 3, pp. 238-249.

논문번호: 12-074	접수: 2012.07.02
수정일자: 2012.07.26/08.07	심사완료: 2012.08.07