



AHP 기법에 의한 농업용 저수지의 상태평가 기준 설정

Establishment of Condition Assessment Criteria in Agricultural Reservoirs by AHP

심재웅^a · 이영학^b · 이달원^{c†}

Shim, Jae-Woong · Lee, Young-Hak · Lee, Dal-Won

ABSTRACT

In this study, in order to establish the criteria for evaluation of importance by the type of facility specialized for agricultural reservoirs, an expert group consisting of a total of 167 members who were in management, or specialized in the fields of design, research, and diagnosis were organized, and the importance for facilities was set with application of the AHP technique. The importance of dam body, spillway, and intake structure composing a reservoir were set at 59%, 24%, and 17%, and the importance of dam crest, upstream slope, and downstream slope constituting a dam body was set at 32%, 31%, and 37%, respectively. In addition, the importance of approach channel, regulated channel, chute channel, and stilling basin consisting a spillway was set at 15%, 44%, 26%, and 15%, and the importance of inclined conduit and outlet conduit consisting an intake structure was set at 35% and 65%, respectively. The safety grade of the reservoirs evaluated by applying the newly presented importance values in this study showed the rearrangement of the grades with a change of 11% compared to the previous grades. In this way, the newly established criteria are expected to be utilized as basic data with strategic importance in reservoir safety management and disaster prevention as well as the operation of systems in the future.

Keywords: AHP; importance arrangement; defect evaluation; safety grade; evaluation index; safety inspection; condition assessment

1. 서론

국내에서 농업용 저수지 (이하 저수지)에 대한 안전관리 및 재해예방 절차는 상태평가와 안전성 평가에 따라 판단하고 있으며, 이를 반영한 정밀안전진단 결과에 따라 보수·보강 조치가 의무화 되어 있다. 상태평가는 안전점검 (안전점검, 긴급안전점검 및 정밀안전진단) 등에서 시설물의 외관을 조사하여 결함의 정도를 포함한 시설물의 상태를 평가하는 것으로, 현시점에서 외관상태를 통한 재해 취약성을 점검하고, 재해를 사전에 대처할 수 있는 태세를 갖추기 위해 필요한 활동으로 볼 수 있다 (MOLIT, 2020). 저수지에 대한 정밀안전진단은 1995년 제정된 “시설물 안전관리에 관한 특별법”을 2017년 전부 개정한 “시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법”과 1994년 제정된 “농어촌정비법”에 근거하여 관리주체별

로 실시하여 왔다. 현재 시행되고 있는 저수지 정밀안전진단은 2010년 제정된 “농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 (KRC, 2010)”의 평가 기준을 기초로 하고 있으며, 이는 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (MOLIT, 2010)”의 평가 기준을 준용하고 있다. 그러나 이 평가 기준은 대규모 댐의 특성에 맞게 개발된 것으로, 시설 규모나 형태 및 구성재료 등이 상이한 저수지의 특성을 반영하지 못하고 있는데 그 원인은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫 번째로, 정량적 관점에서 저수지는 단면구성조건, 물성조건, 규모, 유지관리 상태, 유사시 하류지역에 미칠 수 있는 재해 수준이 대규모 댐과 현저히 다르기 때문에 제체 상태변화에 관한 판단기준이 과대해질 수 있다. 이는 경제, 산업, 사회 전반에 걸쳐 비효율적인 경비소요 및 운용으로 이어지므로 저수지에 특화된 새로운 기준이 정립될 필요가 있음을 보여준다.

두 번째로, 2002년 15호 태풍 루사의 집중호우로 인한 저수지의 붕괴원인은 대부분 제체와 물넘이 측벽 사이의 우수침투로 인한 측벽 전도와 제체 붕괴로 인식되고 있으며, 이와 관련된 해석 및 실험적 연구가 수행되어 왔다 (Kim et al., 2011; Noh and Lee, 2014). 그러나, 실무 진단자들의 대부분은 댐마루 제체 높이의 국부적인 부족과 물넘이 및 여수로 옹벽의 높이 부족을 원인으로 지목하고 있어 상태평가 항목에 추가적인 반영이 필요하고, 이와 관련된 연구수행이 진행되어야 할 것으로 판단된다.

^a Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 15634, Korea

^b National Disaster Management Research Institute, Ulsan 44429, Korea

^c Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-5793, Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

Received: August 10, 2022

Revised: August 22, 2022

Accepted: August 23, 2022

세 번째로, 현재 적용하고 있는 제체와 여수로, 취수시설에 대한 복합시설의 중요도는 각각 65, 25, 10%로서 미국 등 국외 사례를 참조하여 적용된 사례로, 이 기준은 콘크리트 댐과 발전용 댐, 다목적 댐도 포함하고 있다 (MAFRA, 2015). 그러나, 농업생산기반정비 통계연보 (MAFRA, 2020)를 기준으로 국내 농업목적의 저수지중 균일형 및 중심코어형 필댐이 99% 이상을 점유하고 있어, 이러한 국내환경에 접목시킬 수 있는 복합시설의 중요도를 재설정할 필요가 있다.

상태평가는 시설물의 결합정도를 평가하는 것으로 상세의 관조사 등 현장조사 내용을 기초로 평가기준에 따라 개별부재별로 등급을 부여하는 평가 방법이며 (KRC, 2010), 현재 상태평가 기준은 제체 및 양안부, 여수로, 취수시설로 구분하여 각 위치별 세부항목으로 나누어 평가유형과 점수를 산정하게 되어 있다 (KRC, 2010; MOLIT, 2019). 대규모 댐의 특성에 맞게 개발된 현행 기준은 99.8% 이상 필댐으로 이루어진 농업목적의 저수지에 적용하는 것은 적합하지 못하다. 실제 소규모 댐·저수지에 대한 점검 결과 대규모 댐·저수지와는 손상의 정도 및 형식, 취약요소, 피해정도 등이 상이하여 안전 점검 및 정밀안전진단 세부지침 등 기존의 평가기준을 적용하기에는 무리가 있다 (MOLIT, 2008; Shin et al., 2013). 또한, 소규모 저수지는 유지관리 예산 부족과 관리 인력의 전문성 부족, 제도적인 평가기준 미비로 체계적인 유지관리가 이루어지고 있지 못하여 규모가 큰 댐·저수지에 비해 파괴 가능성이 높다는 점이 간과되고 있는 것은 평가 체계의 보완 및 개선사항에 대하여 적절한 근거가 제시될 필요성을 시사한다.

이와 같은 문제들은 90년대 말부터 현재까지 논의되고 있으나, 다양한 환경에서 다양한 형태와 방식으로 시공되고 유지관리되는 저수지에 특화된 상태변화의 기준이 정비되지 않은 것에 원인이 있다. 또한, 대형댐을 기준으로 하는 현 진단 체계는 저수지의 특성이 반영되지 않아 다양한 문제점들이 나타나고 있다.

2020년 이후에 붕괴된 여러 저수지들의 안전등급을 살펴보면 미흡하거나 불량한 상태로 평가된 D, E등급 보다, 양호하거나 보통인 상태로 평가된 B, C등급의 저수지들이 붕괴되었음을 알 수 있다 (Heo, 2016). 파손과 붕괴 사례를 정기점검 결과와 비교해 살펴보면, 전라북도 순창군에 소재한 내령저수지는 제체와 여수로, 취수시설 모두 B등급으로 판정받았으나 2020년 3월 복통파손으로 누수가 발생하였고 (KRC, 2020), 전라북도 익산시에 소재한 동화저수지는 제체 B등급, 여수로와 취수시설 각각 C등급으로 이를 종합한 등급은 B등급 판정을 받았으나 같은 해 7월 복통에서 발생한 누수로 인하여 제체가 붕괴되었다 (Ko, 2020). 특히, 재정 능력이 취약한 시·군·구에서 관리하고 있는 소규모 저수지의 경우 예산과 전

문 관리 인력의 부족으로 인해 체계적인 안전관리가 이뤄지지 않고 있다는 점을 고려하면 중·소형 댐의 붕괴예방에 대하여 안전등급 시스템을 뒷받침할 수 있는 데이터가 마련될 필요성을 시사한다 (KISC, 2013; Kim and Kang, 2020).

저수지 노후화와 7~8월 집중되는 강우는 침식성이 높은 재료특성을 가진 저수지에서 주로 피해가 발생된 것으로 나타나고 있으며, 향후 노후화 문제와 관련한 잠재적인 위험형태의 우선순위 선정을 위한 위험도 해석절차의 도입 필요성을 제시하고 있다 (Lee, 2002; Heo, 2016, 2020). 저수지 안전등급은 각 상태변화에 따른 평가지수에 근거하여 산정되고 있기 때문에 가능한 구체적이고 정확한 데이터의 수치적 산출이 중요하다. 수치적 산출은 저수지의 재해환경 및 시설물 조건이 각각 다르고, 실무진단자들에 의한 실무 안전점검 데이터를 기초로 정량화하는 방법이 합리적이므로 이에 대한 연구가 필요하다.

AHP 기법을 활용하여 Shin et al. (2013)은 국내·외 저수지 파괴 및 손상요인을 분석·종합하여 지자체에서 활용할 정기 점검 리스트를 제안하였고, Lee et al. (2014)은 저수지 수문학적 안전성 평가 방법을 제안했으며, Kim and Kang (2020)은 중소형 저수지의 붕괴위험도를 판단하기 위한 항목별 가중치를 분석하였다.

따라서, 본 연구에서는 저수지에 특화된 시설별 중요도 기준을 마련하고자 분야별 (관리주체, 설계분야, 연구분야, 진단분야) 167명의 대규모 전문가 집단을 구성하고 AHP(Analytic hierarchy process: 계층분석법) 기법을 적용하여 정밀안전진단 (정밀안전점검)의 단계별 평가 시 복합시설과 개별시설에 대한 중요도를 설정하고, 상태평가 시 상태변화의 종류를 저수지 특성을 반영하여 새롭게 제시하고자 한다. 또한, AHP 기법 분석에 의해 산출된 중요도 결과를 기초로 저수지 안전관리 및 재해예방과 함께 효율적인 제도 운영을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 분석

1. 대상 저수지

연구대상 저수지는 2016년부터 2021년까지 실시한 정밀안전진단 (정밀안전점검) 지구 중 농업용수 공급을 위한 저수지가 많이 분포한 경상도와 전라도, 충청남도를 중심으로 102개소를 선별하였다. 시설별 규모에서는 농어촌정비법에 따른 1종 시설 (68개소, 66.7%)과 2종 시설 (34개소, 33.3%)을 본 연구의 대상으로 하였다. Table 1은 연구대상 저수지의 일반현황을 보여준다.

Table 1 Overview of reservoirs in this study

Classification		Number of places	Percentage (%)	Classification		Number of places	Percentage (%)
Management	Korea Rural Community Corporation	74	72.5	Total storage capacity (m ³)	~10,000	10	9.8
	Local government	28	27.5		10,000~100,000	22	21.6
	Total	102	100.0		100,000~300,000	2	2.0
Location	Dae-gu	1	1.0		300,000~1,000,000	20	19.6
	Gang-won	2	2.0		~1,000,000	48	47.1
	Chung-nam	16	15.7		Total	102	100.0
	Jeon-buk	22	21.6	Height (m)	~5	14	13.7
	Jeon-nam	16	15.7		5~15	39	38.2
	Gyeong-buk	25	24.5		15~30	31	30.4
Gyeong-nam	20	19.6	30~		18	17.6	
Total	102	100.0	Total		102	100.0	
Years of Construction	~1945	31	30.4	Length (m)	~50	3	2.9
	1946~1970	31	30.4		50~100	20	19.6
	1971~2000	29	28.4		100~200	20	19.6
	2001~	11	10.8		200~500	44	43.1
	Total	102	100.0		500~	15	14.7
Type	Fill dam	13	12.7		Total	102	100.0
	Fill dam (Zone type)	63	61.8				
	Fill dam (Uniform type)	26	25.5				
	Total	102	100.0				

2. 분석방법

가. 계층 및 설문 구성

본 연구에서는 참여 전문가들의 브레인스토밍을 통해 1, 2, 3계층 요소를 도출하여 상태변화 종류와 평가유형을 범주화하였다. 여기서, 1, 2계층을 구성하는 요소는 농업생산기반 시설 정밀안전진단 실무지침 (KRC, 2010)과 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (MOLIT, 2019)에 따른 분류를 준용하였다. 다만, 3계층은 저수지 정밀안전진단 (정밀안전점검)에서 보고된 상태변화 종류와 평가유형이 현행 상태평가 항목과 다르므로, 전문가 회의를 통해 용어를 정의하고 개선 및 새롭게 정립될 필요성이 있는 항목을 선정하였다. 선정된 상태변화 종류와 연구대상 저수지에서 보고된 발생횟수를 살펴보면 댐마루에서 ① 균열 (136회), ② 건조수축 균열 (2회), ③ 부등침하 (1145회), ④ 함몰 (19회), ⑤ 침식 (178회), ⑥ 식생 (348회), ⑦ 국부적 제체고 부족 (18회)이고, 상류사면에서는 ① 부등침하 및 변형 (377회), ② 함몰 (17회), ③ 침식 (178회), ④ 식생 (1091회), ⑤ 누수 (6회), ⑥ 피복사석 손상 (1107회)이며, 하류사면은 ① 부등침하 및 변형 (495회), ② 함몰 (13회), ③ 침식 (435회), ④ 식생 (1001회), ⑤ 누수 (394회),

⑥ 피복사석 손상 (108회), ⑦ 석축손상 (7회), ⑧ 동물의 굴(11회)로 범주화하였다.

Fig. 1은 본 연구의 계층구성을 보여주며, 이를 기준으로 5점 척도의 설문지를 작성하여 전문가 설문조사를 실시하였다.

나. 전문가 설문조사

설문에 참여한 전문가 167명 중에서 일관성 비율 (Consistency ratio, C.R)이 0.1 이하인 130명의 설문결과를 대상으로 분석을 실시하였다. Fig. 2는 분야별 전문가의 설문 참여 현황을 보여준다. 분석 대상자 130명을 분야별로 살펴보면 한국농어촌공사 지역본부와 지사에서 20년 이상 저수지를 직접 관리하고 있는 관리주체 38인, 한국농어촌공사 본사와 지역본부에서 저수지 설계경험이 있는 설계분야 전문가 9인, 저수지와 관련한 연구경험이 있는 연구분야 전문가 11인, 마지막으로 현재 진단업무에 종사하고 있는 책임기술자급의 진단분야 전문가 72인을 대상으로 하였으며, 설문 조사결과와 객관성을 확보하기 위하여 분야별 종사인원에 비례하여 관리주체, 설계분야, 연구분야, 진단분야별로 전문가 인력 풀을 구성하였다.

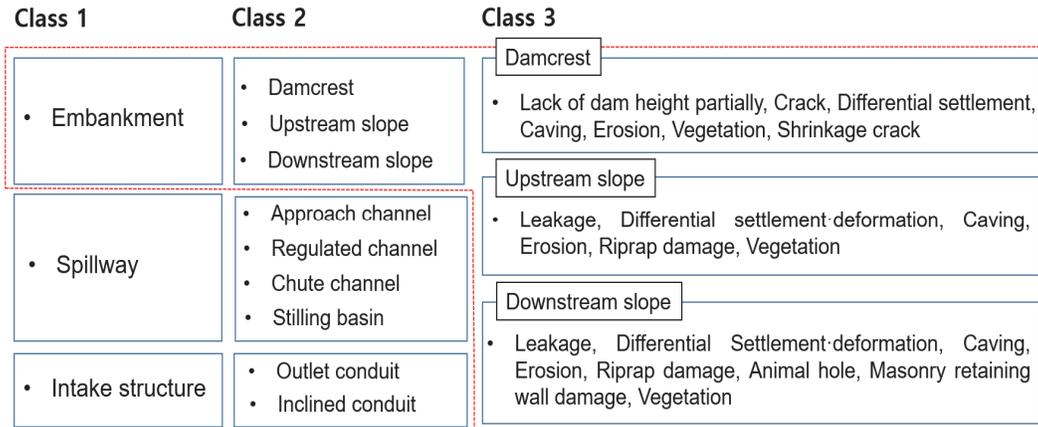


Fig. 1 Hierarchy structuring

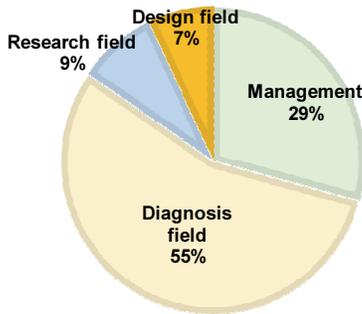


Fig. 2 The survey status of the experts

3. AHP 모델의 적용

가. AHP 모델 개요

AHP 기법은 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 여러 평가 항목의 가중치에 대하여 쌍대비교를 기반으로 평가자의 지식, 경험 및 직관에 의한 문제해결 방식이다 (Saaty and Vargas, 1980). 적용절차는 간결하지만 척도선정, 가중치 산정 절차, 민감도 분석 등에 사용되는 여러 기법에 대하여 실증분석과 수리적 검증과정을 거친 방법들을 사용한다는 점에서 이론적으로도 높게 평가받고 있다. AHP를 5단계로 구분하면 브레인스토밍, 계층구조의 설정, 가중치의 설정, 측정, 검토로 나눌 수 있다 (Saaty and Vargas, 1980; Park et al., 2000; Kim, 2015).

나. AHP 기법의 적용

본 연구에서는 AHP 기법에 의한 결과를 얻기 위해 5단계의 과정과 그에 따른 절차를 준수했으며, Fig. 3은 AHP 기법의 전개과정과 절차를 보여준다.

1단계에서는 저수지에 특화된 평가기준을 마련하기 위하여 상태변화 항목을 구성하고 각 항목에 대한 용어정의와 범

주화를 위한 전문가 회의를 수행하였다. 2단계에서는 농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 (KRC, 2010)과 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (MOLIT, 2019)에 기초하여 1계층은 저수지를 구성하는 제체와 여수로, 취수시설로 설정하였다. 2계층은 제체를 구성하는 댐마루, 상류사면, 하류사면과 여수로를 구성하는 접근수로, 물넘이, 여수로, 감세공, 그리고 취수시설을 구성하는 사통과 복통으로 설정하였으며, 3계층은 댐마루, 상류사면, 하류사면에서의 주요 상태변화 항목으로 설정하였다. 3단계에서는 1~2단계에서 설정된 평가 항목 간 상대적 중요도 또는 선호도를 나타내는 쌍대비교 형태로 5점 비율척도의 설문을 실시하고 가중치를 산정하였다. 4단계는 일관성 검토 (consistency test)로 쌍대비교 설문결과 자료를 수집하여 최대 고유치 (λ_{max})를 구하고, 이로부터 얻은 일관성 지수 (Consistency index, C.I)와 일관성 비율 (C.R) 값으로 일관성을 검증하였다. 5단계는 현행의 상태평가와 AHP 기법에 의해 얻어진 평가지수를 대조하고 이로 인해 현행 저수지 등급의 변화율을 측정하였다.

다. AHP 기법에 의한 중요도 산출과정

농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 (KRC, 2010)과 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 (MOLIT, 2019)에 기초한 저수지의 분류와 전문가 의견 수렴을 통해 분류된 요소를 대상으로 설문을 구성하였으며, 설문지는 5점 비율척도의 각 요소간 쌍대비교 형식이다. Table 2는 1계층인 제체와 여수로, 취수시설에 관한 설문의 예시인데 문항①은 제체가 여수로보다 중요하고, 문항②는 제체가 취수시설보다 중요하며, 문항③은 여수로는 취수시설보다 약간중요하다고 응답하였음을 보여준다.

Table 3은 Table 2의 설문결과 (예시)를 쌍대비교 행렬로

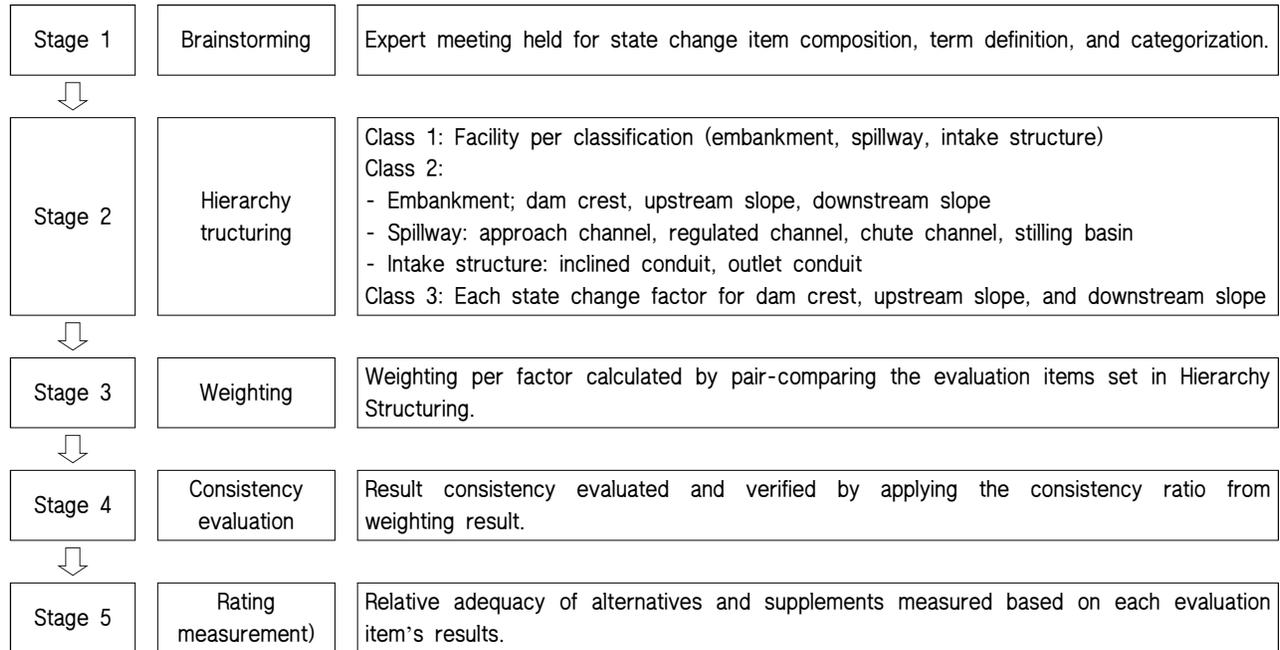


Fig. 3 Progress stages of AHP techniques

Table 2 Survey results for Class 1 (embankment, spillway, intake structures)

Question	Facility for evaluation	AI	VI	I	SI	EI	SI	I	VI	AI	Facility for comparison
		5	4	3	2	1	2	3	4	5	
①	Embankment	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Spillway
②	Embankment	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Intake structure
③	Spillway	5	4	3	2	1	2	3	4	5	Intake structure

* AI: Absolutely important; VI: Very important; I: important; SI: Slightly important; EI: Equally important

Table 3 Calculation process of importance and maximum eigenvalue

Classification	Embankment	Spillway	Intake structure	Geometric mean	Weight	Weight product	Eigenvalue (λ)
Embankment	1	3	3	2.08008	0.59363	1.81273	3.05362
Spillway	1/3	1	2	0.87358	0.24931	0.76130	3.05362
Intake structure	1/3	1/2	1	0.55032	0.15706	0.47959	3.05362
Total				3.50399	1.00000	$\lambda_{max} = 3.05362$	

작성하고 평가항목의 중요도와 최대고유치 (λ_{max})를 구하는 과정을 보여준다.

먼저 측정값을 해당 행렬에 입력하고 대칭되는 곳에 측정값의 역수를 입력한다. 쌍대비교 행렬에서 각 행의 기하평균을 구하고 합계를 구한 후, 각 행렬의 기하평균 값을 기하평균의 합으로 나누어 가중치를 구하는데, 이때 가중치의 합은 항상 1이 된다. 일관성 검토를 위한 고유치 (λ)를 구하기 위해 가중치의 곱을 구하고, 가중치의 곱을 가중치로 나누어 고유

치를 구한 후 최대고유치를 구한다. 이렇게 구한 최대고유치를 다음 식 (1)과 (2)를 이용해 일관성 지수 (C.I)와 일관성 비율 (C.R)을 구한다 (Saaty and Vargas, 1980).

$$C.I = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \tag{1}$$

$$C.R = \frac{C.I}{R.I} \tag{2}$$

Saaty and Vargas (1994)는 일관성 비율 (C.R) 계산을 위해 무작위 지수 (Random index, R.I)를 제안하였고, 행렬의 크기 (n)가 3인 경우 무작위 지수 (R.I)는 0.58이다. Table 3에서 얻은 최대고유치와 식 (1, 2)를 이용해 일관성 지수 (C.I) 0.02681과 일관성 비율 (R.I) 0.04623을 구하였으며, 일관성 비율 (R.I)이 0.1 이하이므로 일관성 있는 응답이라고 판단할 수 있다.

이러한 AHP 기법으로 본 연구에서 설정된 1계층, 2계층, 3계층에 관한 모든 평가항목의 중요도를 이와 같이 동일한 과정을 적용하여 산출하였고, 관리주체, 설계분야, 연구분야, 진단분야 등 전문가 분야별로 산출된 중요도와 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 전문가 분야별 중요도 산정결과

Fig. 4는 복합시설과 개별시설의 중요도에 대한 전문가 분야별 중요도를 나타낸 것이다. 전문가 분야별 중요도는 현재 각 분야에서 저수지 재해에 대한 인식과 향후 유지관리의 방향성을 보여주는 척도가 된다. 이와 같은 척도는 재해 공동 대응 및 연계적인 문제해결을 위한 과정에서 분야별 협업체계를 구성하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다.

저수지를 구성하는 1계층인 제체와 여수로, 취수시설에 대한 중요도는 각각 57.6~60.9, 21.2~25.0, 14.4~21.2%의 범위

로 제체, 여수로, 취수시설 순으로 중요하다고 응답하였다. 이와 같은 결과는 관리주체 등 모든 분야에서 시설물의 중요도를 바라보는 시각은 대체로 유사함을 보여준다. 다만, 취수시설의 경우 관리주체가 21.2%로 다소 높았는데 이는 저수지를 직접 유지·관리하면서 발생하는 크고 작은 사고 중 복통의 문제로 발생하는 사고를 직접 처리하는 경우가 많은 결과가 반영된 것으로 나타났다. 설계분야와 연구분야, 진단분야는 대체로 유사한 범위의 중요도를 가졌다고 응답했지만 평가된 중요도는 조금씩 다르게 조사되었다. 구체적으로, 설계분야는 설계자의 의도대로 저수지가 건설된다는 전제하에 이루어진 응답으로, 시설물의 노후화나 유지관리 상의 문제를 배제하고 각 시설물 중요도 비율이 평가된 것으로 분석되었다. 연구분야 전문가는 일반적으로 상태변화에 대한 원인규명과 취약부 개선에 대한 연구접근이 주로 이루어지므로 상태변화 종류가 다양하고 사고 사례가 많은 제체를 기준으로 중요도로 판단한 것으로 분석된다. 진단분야에서는 현장에서 저수지를 직접 조사하면서 취수시설의 노후화와 이에 따른 문제점을 경험한 결과를 기초로 중요도를 평가한 것으로 분석되었다.

2계층인 제체를 구성하는 세부항목인 댐마루, 상류사면 및 하류사면은 각 분야별로 중요도가 상이하였다. 관리주체와 연구분야는 대체적으로 하류사면이 중요하다고 응답하였으나 상류사면과 댐마루에 대한 중요도 비율의 차가 크지 않았

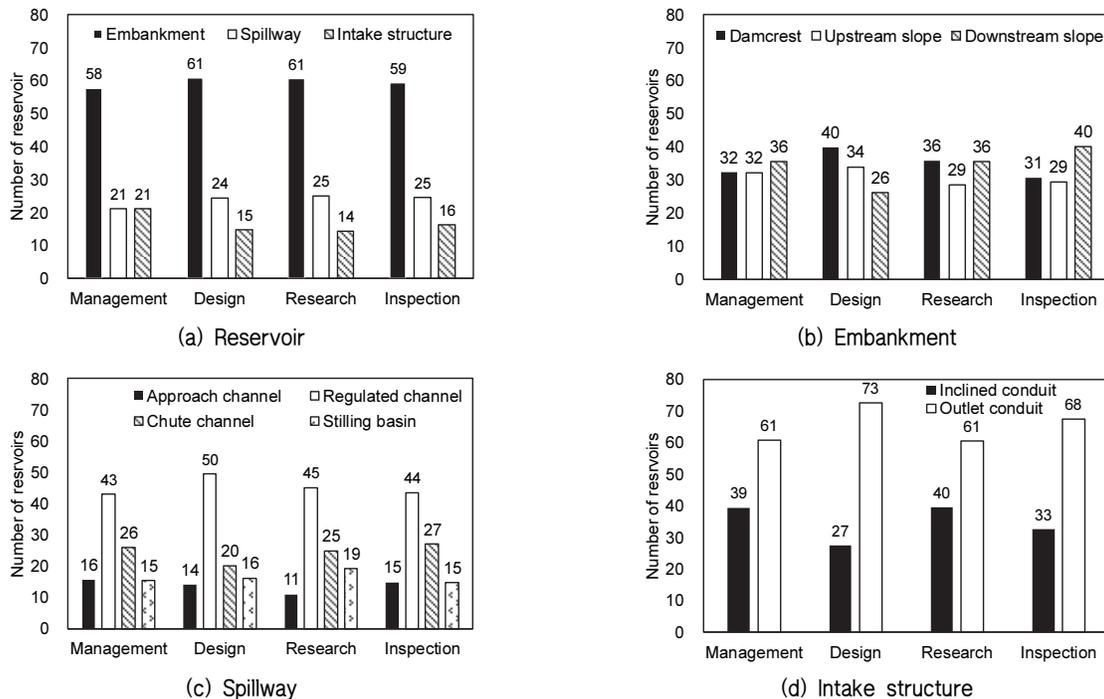


Fig. 4 Results of importance evaluation of facilities by experts

다. 반면, 설계분야는 댐마루의 중요도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 댐마루가 안정되지 않을 경우 균열 등에 의한 사면 임계원 형성의 시발점이 될 수 있다는 점과 상·하류사면에서 발생하는 상태변화는 최종적으로 댐마루의 상태변화로 표출된다는 인식에 따른 것으로 분석되었다. 진단분야는 하류사면의 중요도 비율이 높은 것으로 나타났는데, 이는 현장에서 식별된 상태변화 종류가 많고 실제로 다수의 상태변화가 하류사면에서 식별된 결과가 반영된 것으로 보인다. 여수로와 취수시설을 구성하는 세부항목 중 각각 물넘이와 복통이 큰 비율로 중요하다고 응답하였는데, 물넘이는 홍수량을 적절히 배제하지 못하는 경우 제체와 하류지역에 미칠 수 있는 영향이 크기 때문이며, 복통은 2013년 경주시 산대저수지에서 발생한 복통 결함으로 인한 저수지 붕괴 경험이 반영된 것으로 보인다.

2. 시설별 중요도 및 상태평가 기준 설정

Fig. 5는 기존 중요도와 AHP기법에 의해 새롭게 산출된 중요도를 비교한 것이다. 전문가 설문을 분야를 구분하지 않고 분석하여 산출한 결과, 1계층인 제체와 여수로, 취수시설의 중요도는 각각 59, 24, 17%로 재설정되었으며, 기존 중요도인 65, 25, 10%와 비교해보면 제체가 6% 감소하고, 취수시설이 7% 증가한 특징을 보여주고 있다. 이러한 결과는 취수시설을 구성하는 복통의 대부분이 제체 하부를 관통하여 설치되는 특징으로 인해 2013년 산대저수지 붕괴사고처럼 복통에서 발생하는 사고는 곧바로 제체의 사고로 연결되는 (KRC, 2013) 등 취수시설의 안전 및 위 위험관리의 중요성이 과거보다 높아졌음을 의미한다.

Table 4는 AHP 기법에 의해 산출된 2계층과 3계층의 중요도 산정결과를 나타낸 것이다. 여기서 2계층은 기존에 중요도 기준이 없었기 때문에 본 연구에서 중요도를 새롭게 산출하였고, 3계층은 제체를 구성하는 댐마루와 상류사면, 하류사면에서 범주화된 상태변화 유형을 기준으로 중요도를 산출하였다.

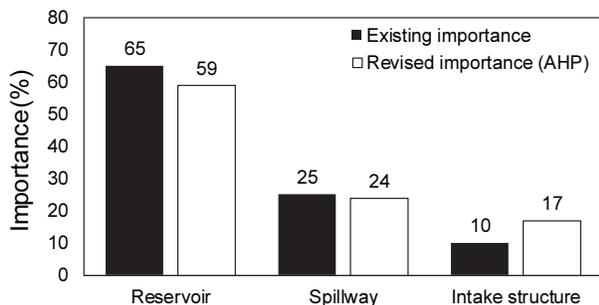


Fig. 5 Comparison between the existing importance and the revised importance by the AHP technique

2계층 중 제체를 구성하는 댐마루, 상류사면, 하류사면의 중요도는 각각 32, 31, 37%로 나타났다. 댐마루와 상류사면의 중요도는 비슷한 반면 하류사면의 중요도가 약간 큰 것으로 나타났는데, 이와 같은 원인은 저수지를 구성하는 개별면적 비율에서 찾을 수 있다. 구체적으로, 상·하류사면에 비해 면적비율이 작은 댐마루와 하류사면과 면적비율은 비슷하지만 항상 물속에 잠겨있어 외관조사 가능면적이 작은 상류사면의 특성에서 찾을 수 있다. 그리고, 여수로를 구성하는 개별시설 중에서 물넘이가 44%로 가장 중요하다고 응답하였는데, 이는 최근 찾아진 기후변화에 따른 집중호우 증가로 취약부 세굴과 상류로부터 운반된 잡목 등 다양한 종류의 잡물에 의한 물리적인 충격과 이로 인한 손상이 크게 증가하는 상황과 동결융해에 반복되어 노출되는 특성을 반영하여 물넘이의 중요도가 높아진 것으로 분석되었다.

마지막으로, 취수시설에서 복통이 65%의 높은 중요도를 나타낸 이유는 지하에 묻혀있어 일상적인 점검이 곤란한 상황과 이로 인한 시설 노후화 심화 및 상태변화에 따른 위험성이 점차적으로 높아지고 있다는 인식이 반영된 것으로 판단된다.

3계층은 분석대상 저수지 102개의 정밀안전진단 (정밀안전점검)에서 보고된 상태변화 정보를 토대로 전문가 회의에서 범주화된 상태변화 종류를 기준으로 중요도를 산출하였다. 댐마루에서 가장 큰 중요도를 나타낸 것은 국부적 제체고 부족으로, 집중호우로 인해 상승한 저수위가 이 부분을 통해 집중적으로 흐르면서 제체 구성재료를 침식시키고 여수로나 물넘이 용벽을 전도시켜 저수지 붕괴 등을 목도한 결과를 반영한 것으로 보인다. 그 다음으로 부등침하가 21%의 높은 수치를 보였는데 부등침하는 제체 내부침식, 다짐불량, 중차량 통행 등 다양한 원인에 의해 발생되며, 일단 부등침하가 발생되면 균열, 단차, 여유고 부족 등 다른 상태변화와 복합적으로 결합하여 저수지에 치명적일 수 있다는 점에서 높은 응답 비중을 가진 것으로 분석되었다. 그리고, 상류사면에서는 누수가 가장 높은 중요도를 보였는데, 이는 상류사면이 수위에 직접 노출되어 있어 수위변동으로 인한 수압변화에 취약할 수밖에 없는 구조적 환경과 상류사면에서 누수가 관찰되었다면 이는 제체내부에서 상당한 침식이 진행되고 있음이 고려된 것으로 분석되었다.

하류사면은 누수와 부등침하 및 변형이 높은 중요도를 가지는 것으로 나타났는데 하류사면은 물속에 잠겨있는 경우가 많은 상류사면과 다르게 상시적으로 외환환경에 노출되어 있어 다른 부위보다 상태변화 종류와 발생빈도가 많으며, 강우나 태풍의 영향으로 인해 상류사면보다 피해가 더 커질 수밖에 없는 조건이 고려된 것으로 분석되었다.

Table 4 Results of evaluation of the importance of facilities by class

Class 1	Class 2	Class 3	
		State change	Importance
Embankment (I: 59%)	Dam crest (I: 32%)	Lack of dam height partially	26%
		Crack	19%
		Caving	14%
		Differential settlement	21%
		Erosion	8%
		Vegetation	5%
		Shrinkage crack	7%
	Upstream slope (I: 31%)	Leakage of water	35%
		Differential settlement and deformation	24%
		Caving	17%
		Erosion	10%
		Riprap damage	8%
	Downstream slope (I: 37%)	Vegetation	6%
		Leakage of water	29%
		Differential settlement and deformation	21%
		Caving	16%
		Erosion	10%
		Riprap damage	8%
Animal hole		6%	
Spillway (I: 24%)	Masonry retaining wall damage	6%	
	Vegetation	4%	
	Approach channel (I: 15%)	Changes in conditions for individual facilities composing the spillway and intake structure are not addressed in this paper.	
	Regulated channel (I: 44%)		
Chute channel (I: 26%)			
Stilling basin (I: 15%)			
Intake structure (I: 17%)	Inclined conduit (I: 35%)		
	Outlet conduit (I: 65%)		

* I: Importance

3. 개선된 평가방법에 따른 안전등급 산정결과

재설정된 복합시설의 중요도와 새롭게 설정된 개별시설의 중요도를 적용하여 연구대상 저수지 102개 지구의 평가지수를 다시 산출하고 안전등급을 새롭게 결정하였다. Table 5는 농업생산기반시설 정밀안전진단 실무지침 (KRC, 2010)에 의한 평가지수와 안전등급과의 관계를 나타낸 것으로 이 평가지수를 근거로 저수지 안전등급을 결정한다.

Fig. 6은 본 연구에 의해 새롭게 산출된 평가지수와 기존의 평가지수를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 먼저 기존 저수지 102개 지구에 대해 종합평가지수를 재산정한 결과, 기존 저수지보다 42개소가 상향 평가되었고, 52개소가 하향 평가되었으며, 8개소는 당초와 평가지수가 동일한 것으로 나타났다. 평가지수 변화폭의 증가는 기존에 적용되었던 기준에 대하여 개선 및 보완된 변경사항이 많음을 의미한다.

Table 5 Safety grade according to evaluation index

Safety grade		Evaluation index (E)
Grade A	Very good	$4.5 \leq E \leq 5.0$
Grade B	Good	$3.5 \leq E < 4.5$
Grade C	Normal	$2.5 \leq E < 3.5$
Grade D	Poor	$1.5 \leq E < 2.5$
Grade E	Very poor	$1.0 \leq E < 1.5$

제체에서 36개소가 상향 평가되었고, 57개소가 하향 평가되었으며, 9개소는 당초와 평가지수가 동일한 것으로 나타났는데, 이는 중요도와 평가유형을 새롭게 적용하여 지수의 변화폭이 상대적으로 커졌기 때문인 것으로 분석되었다. 제체의 경우 구성재료가 흙이고, 규모가 여수로와 취수시설에 비하여 상대적으로 크기 때문에 다양한 상태변화 유형과 상태

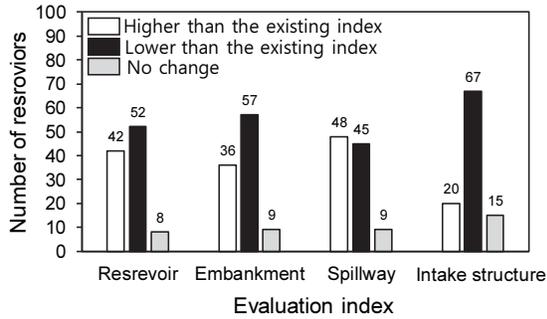


Fig. 6 Comparison of new and existing evaluation index

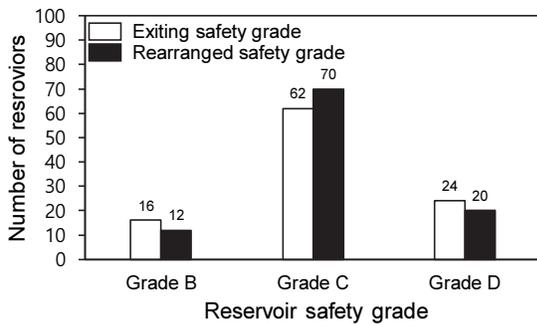


Fig. 7 Results of the rearrangement of reservoir safety grade

변화 발생 확률이 높아 상대적으로 평가지수의 변화폭이 기존과 크게 차이가 나는 것으로 분석되었다.

여수로에서는 48개소가 상향 평가되었고, 45개소가 하향 평가되었으며, 9개소는 당초와 평가지수가 동일한 것으로 나타났다. 여수로에 대한 평가지수의 경우 접근수로와 물넘이, 방수로, 감세공의 중요도만 설정되었기 때문에, 기존에 평가된 지수와 비교하여 변화폭이 상대적으로 작은 것으로 분석되었다.

취수시설에서는 20개소가 상향 평가되었고, 67개소가 하향 평가되었으며, 15개소는 당초와 평가지수가 동일한 것으로 나타났는데, 취수시설의 평가지수는 상대적으로 상태변화가 많이 나타나는 복통의 중요도가 과거보다 높아진 점이 반영된 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 평가지수를 활용하여 포괄적인 안전등급을 평가한 결과를 나타낸 것이다. 기존 저수지 102개 지구의 안전등급을 재산정한 결과, C등급 저수지 1개소와 D등급 저수지 4개소가 각각 B등급과 C등급으로 1등급씩 상향 평가되어, 총 5개소의 저수지가 1등급씩 상향 평가되었다. 그리고, B등급 저수지 5개소와 C등급 저수지 1개소가 각각 C등급과 D등급으로 1등급씩 하향 평가되어, 총 6개소의 저수지가 1등급씩 하향 평가되어, 전체적으로 11개소의 저수지에서 등급의 변화가 나타났다.

종합평가지수의 재산정에 따라 저수지 102개소 중 약 11%에서 등급의 변화가 있었다는 사실은 안정성 확보를 위한 저수지의 유지관리 측면에 있어서 시사하는 바가 크다. 이러한 결과를 토대로 새롭게 설정된 중요도와 상태변화 종류 및 평가유형은 현재 재해 환경에 맞추어 개선 또는 보완되어 일관성을 가질 수 있는 결과로 판단된다. 제체 유지관리 계획 및 보수·보강 여부는 저수지 안전등급에 따라 반영되므로, 본 연구에서 제시된 기준은 향후 실무지침에 반영하여 저수지 재해대비 및 유지관리 계획에 반영할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 연구는 저수지에 특화된 시설별 중요도 기준을 마련하고, 정밀안전진단(정밀안전점검) 보고서와 상태변화 데이터를 기초로 제체에서 발생하는 상태변화를 범주화하고 평가유형을 새롭게 설정하였다. 분야별 전문가 집단을 대상으로 설문을 실시하고 AHP 기법을 통하여 제시한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

저수지를 구성하는 1계층 평가항목 대하여 AHP기법에 의해 중요도를 재설정한 결과, 제체는 기존 65%에서 59%로, 여수로는 25%에서 24%로 각각 하향되었고, 취수시설은 10%에서 17%로 상향되었다. 이러한 변동성은 최근 노후화로 인한 복통의 상태변화와 이에 따른 사고가 취수시설의 중요도를 높인 결과로 분석되었다.

제체와 여수로, 취수시설을 구성하는 2계층 평가항목은 기존의 중요도 기준이 없어 본 연구에서 중요도를 새롭게 설정하였다. 2계층 중 제체를 구성하는 댐마루, 상류사면, 하류사면의 중요도는 각각 32, 31, 37%로 비슷한 범위내의 비율을 나타내었는데, 이들 개별시설에 대한 균형적인 관리가 필요한 것으로 분석되었다. 여수로를 구성하는 접근수로와 물넘이, 방수로, 감세공에 대한 중요도는 15, 44, 26, 15%이며, 취수시설을 구성하는 사통과 복통에 대한 중요도는 35, 65%로 나타났다. 이와 같은 결과는 향후 저수지 안전관리 및 재해예방에 관한 기초자료로서 활용될 것으로 기대된다.

새로운 기준을 적용하여 평가지수를 다시 산출하고 안전등급을 새롭게 결정한 결과 기존 안전등급과 비교하여 11%의 등급 변화가 발생하였다. 제체 유지관리 계획 및 보수·보강 여부는 저수지 안전등급 수준에 따라 반영되고 있으므로, 정밀안전진단(정밀안전점검)시 본 연구결과를 적용하여 평가함으로써 일관성 있고 신뢰성 있는 진단결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

관리주체, 설계분야, 연구분야, 진단분야 등 분야별 전문가

의 저수지 구성요소에 대한 중요도 인식 차이는 향후 저수지 유지관리 및 재해에 대비한 연계적인 문제해결을 위한 과정에서 협업체계를 구성하는데 유용한 정보를 제공하여 상호 보완의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Heo, G., 2016. Schematic development of risk analysis for dam safety. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(2): 11-20. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.2.011.
2. Heo, G., 2020. Investigation of the failure of reservoir due to rain. In *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 24(2): 154. (in Korean).
3. Kim, B. W., 2015. *Decision making analytic hierarchy process*. Seoul: eutteum-sa (in Korean).
4. Kim, J. Y., and J. M. Kang, 2020. Risk analysis method for deriving priorities for detailed inspection of small and medium-sized fill dam. *Journal of the Korean GEO-environmental Society* 21(10): 12-13. (in Korean). doi:10.14481/jkges.2020.21.10.11.
5. Kim, Y. I., K. S. Yeon, K. S. Kim, J. W. Jeong, and Y. S. Kim, 2011. An experimental study of reservoir failure phenomena according to transitional zone: spillway scour during overflow. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(2): 27-33. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2011.53.2.027.
6. Ko, J. h., Loss of embankment at donghwa reservoir in Iksan. <http://www.naewoilbo.com/news/articleView.html?idxno=287678>. Accessed 22 Aug. 2020. (in Korean).
7. Korea Infrastructure Safety Corporation (KISC), 2013. A Study on the safety evaluation and repair · reinforcement of small dams · reservoirs. Jinju-si, Korea (in Korean).
8. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2010. Practical guidelines for precision safety diagnosis of agricultural production infrastructure. Naju-si, Korea (in Korean).
9. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2013. Sandae reservoir precision safety diagnosis report. Naju-si, Korea (in Korean).
10. Korea Rural Community Corporation (KRC), 2020. Casebook of overcoming natural disasters. Naju-si, Korea (in Korean).
11. Lee, J. J., J. S. Park, and K. H. Rhee, 2014. Development and application of hydrological safety evaluation guidelines for agricultural reservoir with AHP. *Journal of Wetlands Research* 16(2): 235-243. (in Korean).
12. Lee, J. S., 2002. Application of risk analysis for dam safety assessment. *Journal of Korea Water Resources Association* 35(6): 651-652. (in Korean).
13. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2015. The improvement of assessment criteria and techniques of safety inspection for agricultural infrastructures. Sejong-si, Korea (in Korean).
14. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2020. Statistical yearbook of land and water development for agriculture. Sejong-si, Korea (in Korean).
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2008. 2010. 2019. 2020. Guidelines for safety and maintenance of facilities. Sejong-si, Korea (in Korean).
16. Noh, J. J., and D. W. Lee, 2014. Behavior of failure for embankment and spillway transitional zone of agriculture reservoirs due to overtopping. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(1): 71-79. (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2014.56.1.071.
17. Park, H., K. K. Ko, J. Y. Song, and K. S. Shin, 2000. A study on multi-criteria analysis method for preliminary feasibility study: Report on Feasibility Study on Publicly-financed Projects Guideline. Sejong-si, Korea Development Institute (KDI) (in Korean).
18. Saaty T. L., and L. G. Vargas, 1980. Hierarchical Analysis of Behavior in Competition. *Behavioral Science* 25(3): 181-191.
19. Saaty T. L., and L. G. Vargas, 1994. Decision Making in Economic, Political, Social and Technological Environments with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: University of Pittsburgh.
20. Shin, E. C., C. G. Shin, J. M. Ryu, and J. K. Lee, 2013. Determination of agricultural reservoirs checklist by analysis of the weights. *Journal of the Korean Geosynthetics Society* 12(3): 81-86. (in Korean). doi:10.12814/jkgss.2013.12.3.081.