Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.2.045

Vol. 60, No. 2, pp. 45~53, March 2018
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

물-에너지 넥서스기반 국내 댐 가능최대 수열에너지 산정

Estimation of the Probable Maximum Water Thermal Energy in Korean Dams based on the Water-Energy Nexus Concept

정영훈*,†
Jung, Younghun

Abstract

Demand for essential resources including water, energy and food is rapidly increasing due to climate change, population growth and urbanization. To solve this problem, the concept of water-energy-food nexus has been introduced, and many countries have been trying to acquire the Nexus technology that can maximize the efficiency by analyzing the interconnection between resources. In this regard, this study attempted to estimate the probable maximum water thermal energy in the dam based on the water-energy nexus concept. The estimation of the probable maximum water thermal energy was implemented to monthly water storage of the largest dams in the four major river systems. As a result of analyzing the estimated monthly water thermal energy from 2000 to 2016, Soyang River dam has the largest probable maximum water thermal energy, and Sumjin River dam has the smallest. However, the probable maximum water thermal energy was small in common between March and April, between September and October due to the small temperature difference between the ambient air and the dam water. Also, according to the characteristics of the dam, Daecheong dam and Soyang River dam were beneficial for supplying water thermal energy for heating, and Sumjin River dam and Andong dam were advantageous for supplying water thermal energy for cooling. Our findings can be useful to realize the water-energy-food nexus by increasing the utilization and value of water resources as well as expanding the roles and functions of dams as a starting point to use dam water thermal energy.

Keywords: Dam; nexus; renewable energy; temperature; water thermal energy

Ⅰ. 서 론

전 세계적인 기후변화, 인구증가, 도시화, 자원고갈에 따른 물, 에너지, 식량과 같은 필수 자원의 수요량 증가는 수급 불균형으로 글로벌 자원안보 위기를 고조시키고 있다. 이에 따라 2050년에는 현재보다 전 세계적으로 자원수요가 물은 55 %, 에너지 80 %, 식량 60 % 더 증가할 것으로 예상된다 (Rockström et al., 2009). 국내의 경우도 경제성장으로 인한 생활패턴의 변화, 중산층 증가, 도시인구 증가로 인하여 이러한 필수 자원에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히, 기후변화는 강우강도, 지속시간, 발생빈도 등과 같은 수문현상을 변화시켜 물 공급 및 소비 예측에 불확실성을 증가시키고 있다. 이러한 수문변동성의 증대는 식량생산의 어려움을 더하고 이는 농작물 가격상승으로 이어질 수 있다. 뿐만 아니라 온도가 상승함에 따라 냉방에너지의 소비가 급격히 증가하고 이에 따라 시설재배에 필요한 에너지를 소비해야 하는 농가 입장에선 농작물 생산에 경제적 부담감이 증대하고 있다. 국내 에너지 생산은 해외의존도가 매우 높으며 대부분 에너지가 원자력에 의존하고 있는 실정이다. 더욱이 국제협의에 따른 신기후체제는 이산화탄소 감소 의무량 정책과 신재생에너지 개발을 요구하고 있다. 이러한 상황에서 국내 자원공급은 국제 자원시장에 매우 민감하게 반응하기 때문에 자원 소비에 있어 그 효율성을 높여 자립적으로 자원을 확보할 수 있는 기술이 필요하다. 물-에너지-식량 넥서스 (Water-Energy-Food Nexus)는 자원간 상호의존성을 분석하여 자원 생산 공급 소비의 과정을 연계함으로써 자원의 효율성을 높일 수 있다는 개념이다.

신재생에너지는 전 세계적으로 기후변화 대응을 위해 보급되고 있으며 국내에서도 신재생에너지 산업 육성을 통하여 신성장동력을 확보하고 새로운 일자리를 창출하고자 노력하고 있다. 이러한 노력은 2015년 총 1차 에너지의 4.62 %를 신재생에너지가 차지하고, 최근 5년간 (2011~2015) 국내 신재생 전력 공급 증가율이 연평균 20.9 %로 급격히 증가하다는 것으로부터 예측할 수 있다 (KEMCO, 2016a). 이러한 신재생에너지는 물-에너지-식량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 수

* Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University
† **Corresponding author**
Tel.: +82-54-530-1253 Fax: +82-54-530-1258
E-mail: y.jung@knu.ac.kr
Received: October 30, 2017
Revised: December 28, 2017
Accepted: December 28, 2017

상태양광, 해상풍력, 지하수열, 수열, 폐수열 등의 이용은 물-에너지 연계의 대표적인 예라고 할 수 있으며, 이러한 에너지 생산 기술이 자원간 연계를 통한 넥서스 기술이라 할 수 있다. 이러한 에너지원 가운데 수열에너지는 물과 대기의 온도차를 활용하여 에너지소비에 있어 그 효율을 높을 수 있는 기술이며 주로 생활 및 산업 냉난방에 많이 활용될 수 있다. 수열에너지는 물-에너지의 연계로만 인식될 수 있으나 이렇게 생산된 에너지가 시설재배와 같은 식량생산에 기여했을 때 이는 물-에너지-식량 넥서스를 실현하는 것이다. 그러나 수열에너지는 산업측면에서 그 비중이 매우 적으며 (Table 1) 지하열의 온도차를 이용하는 소규모 형태가 대부분인 실정이다.

온도차를 이용한 수열에너지의 국내 적용사례는 1991년 서울 마포변전소 지하에 있는 변압기에서 방출되는 열을 열펌프로 회수하여 건물 난방에 이용한 것부터 시작이 된다 (KIER, 2005). 하천수의 수열에너지의 부존량과 이용가능량에 대한 연구가운데 서울 상암지구에 하천수 수열에너지를 적용하였을 경우 약 35 %의 에너지 절약효과를 보였다 (Park and Chang, 2002), 또한, 국내 하천수에 대한 미활용에너지로 속해있는 수열에너지의 부존량은 약 연간 192,000 Tcal으로 산정되었으며 열펌프를 이용하여 연간 난방은 1216 Tcal, 냉방은 724 Tcal를 대체할 수 있으며 연간 이용가능량이 약 2,000 Tcal로 약 22 %의 에너지절감효과를 보였다 (KIER, 2005). 그러나 하천에서 취수해서 수열을 이용하는 것은 취수량에 따라 하천 건전성에 영향을 줄 수 있으며 국내와 같이 계절에 따라 하천변동성이 큰 지역에는 수열에너지 이용성을 저하시킬 수 있다. 이러한 면을 고려했을 때 저수지나 댐 수원을 이용하는 것이 유리할 수 있다. 국외 경우 이미 온도차를 이용한 댐과 저수지에서 수열에너지의 실질적인 적용을 노르웨이, 미국, 일본, 중국, 스웨덴에서 발견할 수 있으며 (Chen et al., 2006; Kavanaugh, 1989; Kidaichi et al., 2015; Mitchell et al., 2013; Peer and Joyce, 2002) 국내에서도 현재 소양강 댐의 수원으로부터 수열에너지를 이용한 K-cloud Park을 조성을 계획하고 있다.

앞에서 언급하였듯이 물-에너지-식량 넥서스는 물과 에너지의 상호작용에서 물이 가지고 있는 에너지를 생산하고 이러한 에너지를 식량생산에 공급했을 때 실현이 가능하다. 그렇다면, 식량생산이나 다른 인간생활에 에너지를 공급하는데 있어 국내 지표수를 가장 많이 담고 있는 댐에 내재되어 있는 수열에너지는 얼마나 많은 기여를 할 수 있을까? 라는 질문에서 본 연구는 시작하였다. 따라서, 본 연구의 목적은 댐의 월별 저수용량에 대한 수열에너지를 산정하여 가능최대 공급 수열에너지를 산정하는 것이다. 이를 위해서 4대강 수계에 위치한 댐들 가운데 저수용량이 가장 큰 댐에 대하여 월별 댐 저수량 및 댐의 수온과 대기온도의 차이를 바탕으로 월별 가능최대 공급 수열에너지를 산정하였다.

II. 재료 및 연구방법

1. 대상지역

수열에너지를 산정하기 위해서는 댐의 수온과 대기온도의 차이와 더불어 활용할 수 있는 물의 양이 중요한 인자이다. 따라서 댐 수원의 이용은 댐 수열에너지의 활용을 높일 수 있다. 국내 댐은 총 85개로 K-water, 한국수력원자력, 한국농어촌공사에서 관리하고 있다 (WAMIS). 본 연구에서는 댐 수원이 클수록 수열에너지량이 많아지는 것을 고려하여 국내 4대강

Table 1 industry Statistics on Renewable Energy in Korea (source: KEMCO, 2016b)

Energy Source	No. of Company		No. of Employee		Sales (KRW 100 M)					Investment (KRW 100 M)	
		%		%	Total	%	Domestic Sales	Export	Oversea Branches		%
Solar photovoltaic	127	26%	8,698	54%	75,637	67%	22,975	33,892	18,770	5,324	67%
Solar thermal	21	4%	228	1%	290	0%	290	–	–	1	0%
Wind	37	8%	2,369	15%	14,571	13%	5,123	5,639	3,809	583	7%
Fuel-cell	15	3%	802	5%	2,837	3%	2,143	693	–	47	1%
Geo-thermal	26	5%	541	3%	1,430	1%	1,430	–	–	251	3%
Water-thermal	3	1%	46	0%	29	0%	29	–	–	–	–
Hydro-power	4	1%	83	1%	129	0%	116	13	–	–	–
Bio	128	26%	1,511	9%	12,390	11%	11,884	506	–	221	3%
Waste	132	27%	1,899	12%	5,763	5%	5,763	0	–	1,539	19%
Sum	473[주]	100%	16,177	100%	113,077	100%	49,754	40,743	22,579	7,965	100%

각 유역에서 가장 큰 저수용량을 가지는 다목적 댐들을 선택하여 이 댐들이 가지는 수열에너지를 산정하였다(Fig. 1). 저수용량은 유역별로 한강 유역은 소양강댐, 금강 유역은 대청댐, 영산강-섬진강 유역은 섬진강댐, 낙동강 유역은 안동댐이 가장 큰 것으로 나타나 이 댐들을 본 연구의 대상 댐으로 선정하였다(Table 2). 선택된 댐의 특성을 살펴보았을 때, 배수면적은 금강수계의 대청댐이 3,204 Km^2로 가장 넓었으며 한강수계의 소양강댐이 2,900 Mm^3의 가장 큰 저수용량을 가지는 것으로 나타났다. 대청댐이 배수면적은 소양강댐보다 더 넓지만 저수용량은 더 작았다. 이는 댐의 높이로부터 그 원인을 찾을 수 있다. 물의 물리적인 특성상 대기온도가 상온일 때 수심이 깊을수록 수온은 낮아지며 계절별 수온의 변화가 적다. 수열에너지의 활용할 경우 수심이 깊은 댐의 수원을 이용하는 것은 대기온도가 상온일 때 상대적으로 가장 저온의 수열에너지를 이용하고 대기온도가 저온일 때 상대적으로 가장 고온의 수열에너지를 이용할 수 있는 기회를 준다. 또한, 수심이 깊을수록 수온의 변화가 적기 때문에 수열에너지 공급의 안정성이 확보될 수 있다.

2. 수열에너지 산정방법 및 자료

지표수 및 해수의 온도차를 이용한 에너지생산은 사용 방법에 따라 다르게 정의될 수 있다. 일반적으로 수열에너지의

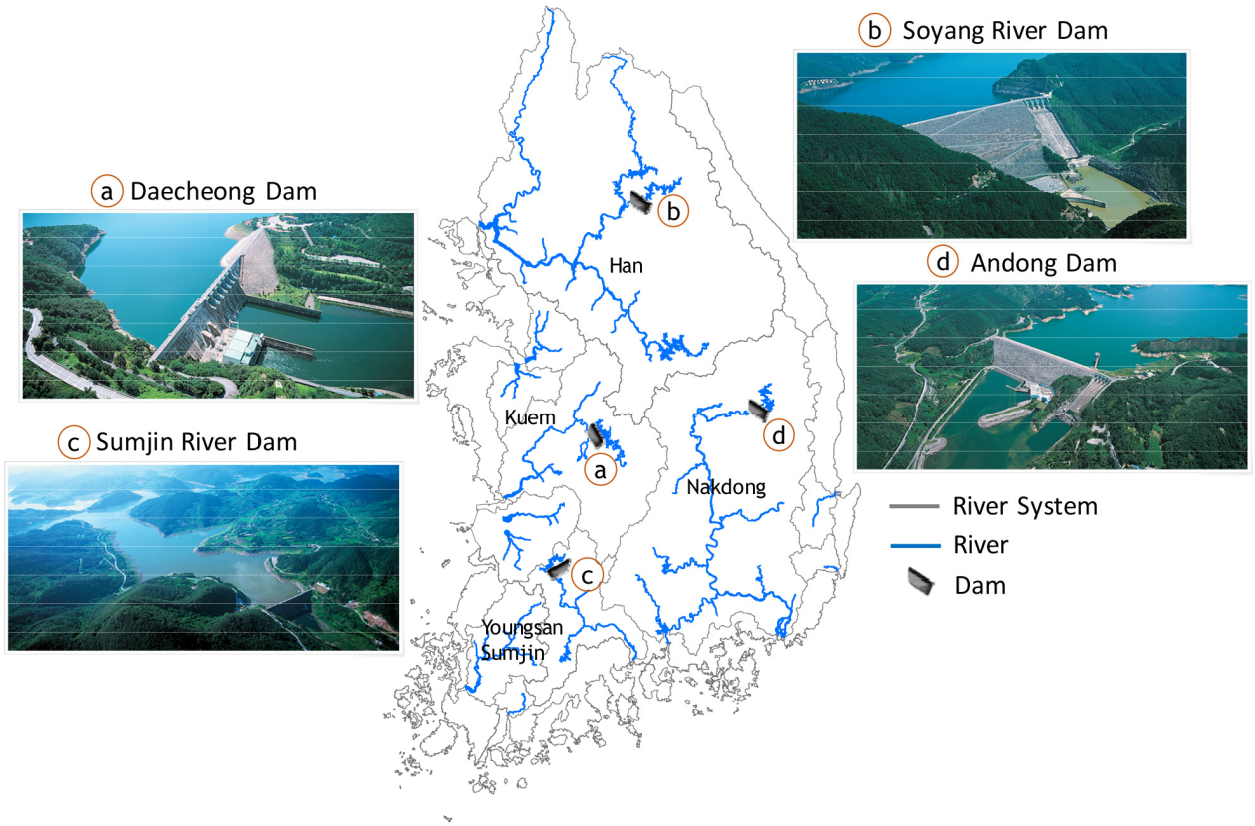


Fig. 1 Study Dams (Source: WAMIS)

Table 2 Dam Specification (Source: WAMIS)

Name	River System	Drainage Area (Km^2)	Storage Capacity (M m^3)	Effective Capacity (M m^3)	Reservoir Surface Area (Km^2)	Dam Height (m)
Daecheong Dam	Keum	3,204	1,490	790	72.8	72
Soyang River Dam	Han	2,703	2,900	1,900	70.0	123
Sumjin River Dam	Youngsan-Sumjin	763	466	370	26.5	64
Andong Dam	Nakdong	1,584	1,248	1,000	51.5	83 (E)

where, Dam height The dam height means from the bottom of the dam to the top. M and (E) mean Million and elevation, respectively.

경우는 히트펌프를 이용해 열을 공급하는 방식을 취한다. 그러므로 열교환 기의 입구와 출구 사이의 온도차는 실제 사용 가능한 열량으로 간주되며, 일반적으로 열 교환기의 입구와 출구 사이의 온도 차이는 약 3~5 ℃이다. 그러나 히트펌프의 조건 및 성능에 따라 수열에너지의 양은 크게 달라질 수 있다. 이러한 히트펌프의 성능 및 조건은 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 월별 댐 저수용량에 근거한 가능최대 수열에너지 산정에 초점을 맞추었다. 따라서, 월별 가능최대 수열에너지 양은 히트펌프를 사용하여 실질적으로 이용가능한 에너지양보다 훨씬 클 수 있다. 본 연구에서 월별 댐 저수용량에 근거한 가능최대 수열에너지 (E)를 산정하기 위하여 일본 (Takeshi et al., 1993)에서 사용된 방법을 사용했다 (식 (1)).

$$E = \triangle t \times C_w \times W \quad (1)$$

여기서, $\triangle t$ = 온도차 (℃), $C_w = 1.0 Mcal/(m^3 \cdot ℃)$, W = 월별 댐 저수량 (m^3)

선행된 하천수 수열에너지 산정에 있어서 W는 유량의 개념을 가지고 산정하였다 (Kim et al., 2015). 그러나 본 연구에서는 가능최대 수열에너지를 산정하기 위하여 유량대신 월별 저수량을 적용하였다. 따라서 수열에너지도 그 단위가 [에너지/시간]이 아닌 [에너지]가 된다. 또한, 온도차를 대부분 히트펌프 열교환기의 출·입구의 온도차인 3~5 ℃를 적용했지만 본 연구에서는 가능최대 수열에너지를 산정하기 위해서 대기온도와 댐 수온의 온도차이를 적용하였다. 본 연구에서는 가능최대 수열에너지를 산정하기 위해서 실질적으로 댐의 유입과 방류로 인하여 댐에 저수되어 있는 월별 저수량을 사용하였다. 그러나 이러한 월별 저수량은 수열에너지를 활용하기 위해 용수를 사용한다면 다음 월의 댐 저수량에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 영향을 고려하지 못하기 때문에 실제 월별 댐 저수량에 기반하여 월별로 수열에너지를 최대로 회수할 수 있는 가능최대 수열에너지를 산정하였다. 본 연구에 적용된 댐 저수량은 WAMIS (http://www.wamis.go.kr/)에서 제공하는 월별 댐 저수량을 사용하였고, 수온자료는 환경부 물환경정보시스템 (http://water.nier.go.kr)에서 제공하는 월 평균 수온을 산정하였다. 환경부에서 제공하는 수온자료는 댐별 공간적으로 다른 3~6곳의 장소에서 각각 상층, 중층, 하층에 대하여 월 2~3회 측정한 수온의 평균값이다. 또한, 대기온도는 기상청에 제공하는 월평균 자료를 이용하였으며, 소양강댐은 춘천관측소, 대청댐은 대전관측소, 안동댐은 안동관측소, 섬진강댐은 정읍관측소의 자료를 적용하였다. 자료기간은 공통적으로 2000년부터 2016년까지이다.

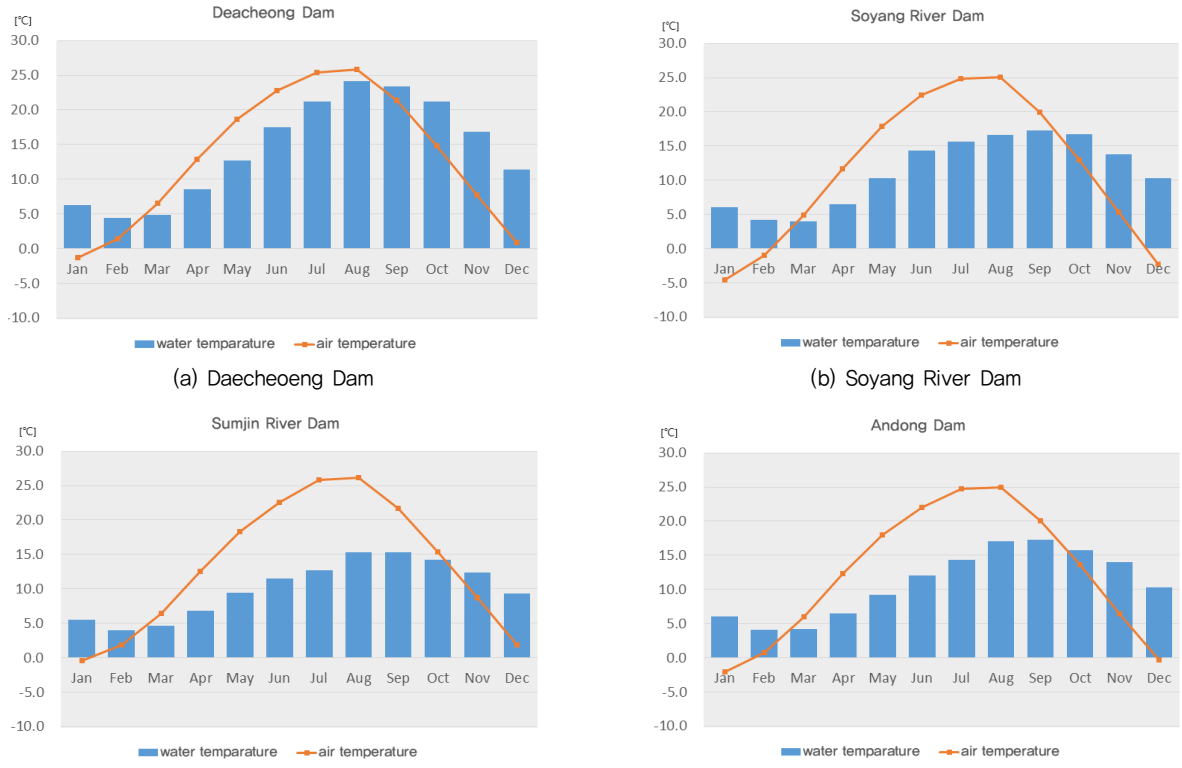
Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 댐별 대기온도와 수온의 차

수열에너지를 산정하는데 있어서 대기온도와 수온의 차이는 직접적인 영향을 주기 때문에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 온도차는 냉방시스템과 난방시스템에 공급할 수 있는 에너지를 선택할 수 있는 지표이기도 하다. 예를 들어 수온이 대기온도보다 낮으면 냉방시스템에 사용할 수 있는 에너지를 공급할 수 있으며, 수온이 대기온도보다 높으면 난방시스템에 활용될 수 있는 에너지를 공급할 수 있다. 그러나 대기와 댐수원의 온도차는 일정하지 않으며 시간별, 일별, 월별 온도차가 다르다. 특히, 이러한 온도차는 시간해상도 (temporal resolution)이 작을수록 (시간별) 대기온도에 의한 영향이 크다 할 수 있다. 댐 수원의 온도는 물의 밀도가 공기 밀도보다 훨씬 더 크기 때문에 온도의 변화에 덜 민감하다. 시간해상도가 작은 (시간별, 일별) 수열에너지를 산정하면 보다 정확한 가능최대 공급 수열에너지를 산정할 수 있지만 댐의 수온은 월별 2~3차례로 측정하기 때문에 시간별 수열에너지를 산정하기에는 불확실성이 크다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 월별 대기온도와 댐 수온의 차이를 산정하여 수열에너지를 산정하였다.

댐의 월별 대기온도와 수온의 차이는 수열에너지를 산정하는데 결정적인 역할을 한다 (Fig. 3). 2000부터 2016년까지 평균 월별 대기온도는 1월에 모든 댐에서 영하의 온도를 나타냈으며, 대청댐 (-1.2 ℃), 소양강댐 (-4.6 ℃), 섬진강댐 (-0.4 ℃), 안동댐 (-2.1 ℃)으로 가장 낮은 온도를 보였다. 또한, 대청댐 (25.9 ℃), 소양강댐 (25.1 ℃), 섬진강댐 (26.2 ℃), 안동댐 (25.0 ℃)으로 모든 댐이 8월에 가장 높은 평균 월별 대기온도를 나타냈다. 평균 월별 대기온도의 표준편차는 소양강댐에서 약 10.8℃로 가장 컸으며 섬진강댐에서 약 9.7 ℃로 가장 낮았다. 반면 댐의 평균 월별 수온의 경우 대청댐 2월 (4.4 ℃), 소양강댐 3월 (4.0 ℃), 섬진강댐 2월 (4.0 ℃), 안동댐 2월 (4.1 ℃)에 가장 낮았다. 또한 최대 수온은 대청댐 8월 (24.1 ℃), 소양강댐 9월 (17.3 ℃), 섬진강댐 8월 (15.4 ℃), 안동댐 9월 (17.3 ℃)에 나타났다. 평균 월별 수온의 표준편차는 대청댐에서 약 7.3 ℃로 가장 컸으며 섬진강댐에서 약 4.1 ℃로 가장 낮았다. 여름철 대청댐의 수온이 다른 댐보다 높은 이유는 저수량에 비해 댐의 높이가 상대적으로 낮기 때문에 대기의 온도에 영향을 받는 것으로 예상된다. 월별 대기온도와 수온이 계절별로 다르고 월별 대기온도가 수온보다 그 편차가 훨씬 크다는 것은 댐의 수원을 이용한 수열에너지를 냉방 혹은 난방용으로 선택하여 공급할 수 있다는 것을 의미한다.

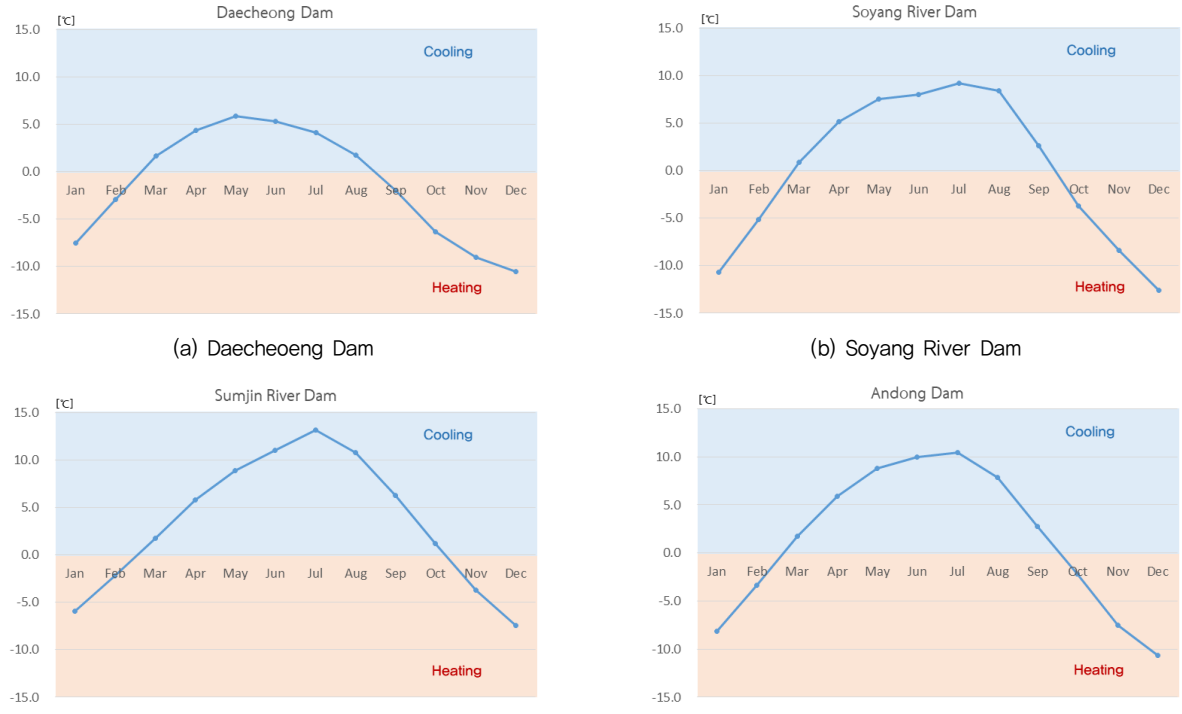
2000~2016년 댐별 평균 월별 온도차이를 분석한 결과 모



(a) Daecheoeng Dam (b) Soyang River Dam

(c) Sumjin River Dam (d) Andong Dam

Fig. 2 2000~2016 Average monthly temperature of ambient air and dam water [°C]



(a) Daecheoeng Dam (b) Soyang River Dam

(c) Sumjin River Dam (d) Andong Dam

Fig. 3 2000~2016 average monthly temperature difference between ambient air and dam water

든 댐에 대하여 2월과 3월 사이에 수온이 대기온도보다 높아져 이 시기부터 냉방 시스템에 사용될 수 있는 수열에너지를 공급할 수 있는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 반면 난방시스템에 활용될 수 있는 수열에너지의 경우 대청댐은 8월과 9월 사이부터 (Fig. 3a), 섬진강은 10월과 11월 사이부터 (Fig. 3c), 소양강댐과 안동댐은 9월과 10월 사이부터 (Fig. 3b and 3d) 에너지 공급이 가능하다. 일반적으로 8월과 9월사이에는 냉방수요 때문에 냉방시스템을 위한 수열에너지 활용이 필요하지만 대청댐의 경우 오히려 냉방을 위한 수열에너지보다는 난방을 위한 수열에너지 공급이 가능하게 나타났다. 그러나 이 시기에는 온도차이가 매우 적기 때문에 현실적으로 수열에너지를 공급하기는 어려울 것으로 판단된다. 댐별 냉방에너지 공급을 위한 최대 온도차는 대청댐 5월 (5.9 °C), 소양강댐 7월 (9.2 °C), 섬진강댐 7월 (13.2 °C), 안동댐 7월 (10.5 °C)로 나타났다. 반면 댐별 난방에너지 공급을 위한 최대 온도차는 모든 댐에 대하여 12월에 나타났으며, 대청댐 (-10.6 °C), 소양강댐 (12.6 °C), 섬진강댐 (-7.4 °C), 안동댐 (-10.6 °C)으로 나타났다. 이러한 결과는 1월에 모든 댐의 대기온도가 가장 낮았지만 12월의 댐 수온이 1월의 댐 수온보다 더 높았기 때문에 온도차가 12월에 가장 큰 것으로 나타났다. 수열에너지 활용에 있어 온도차의 관점으로만 보았을 때 대청댐은 냉방보다는 난방에 유리한 수열에너지 온도차를 가지고 있으며, 소양강댐, 섬진강댐, 안동댐은 냉방이 유리한 수열에너지 온도차를 보유하고 있다. 이러한 결과는 댐별로 사용할 수 있는 수열에너지 특성이 다르다는 것을 보여준다. 이러한 구분은 댐의 수열에너지 특성을 고려하여 수열에너지 활용계획을 적절히 수립할 수 있는 기초자료가 될 수 있다.

2. 댐별 저수량

댐의 월별 저수량은 대기와 댐수원의 특정 온도차이로 공급할 수 있는 있는 수열에너지량을 결정한다. 즉, 어느 일정 온도차의 조건에서 저수량이 많을수록 수열에너지는 증가한다는 것을 의미한다. 본 연구에서 선택된 댐들 가운데 2000~2016년에 소양강댐이 월평균 1,502 Mm^3으로 가장 많은 저수량을 보유하였으며, 섬진강댐이 월평균 216 Mm^3의 가장 낮은 저수량을 가지고 있다. 평균 월별 저수량을 분석한 결과, 최대 저수량은 대청댐 9월 (978 Mm^3), 소양강댐 9월 (1,872 Mm^3), 섬진강댐 9월 (244 Mm^3), 안동댐 10월 (730 Mm^3)로 나타났다. 또한, 모든 댐들은 6월에 최소 저수량을 보였으며, 댐별로는 대청댐 680 Mm^3, 소양강댐 1,121 Mm^3, 섬진강댐 143 Mm^3, 안동댐 475 Mm^3로 나타났다. 이러한 저수량은 댐 유입량과 유출량에 따라 변화될 수 있으며, 각 댐의 운영 룰 (rule)에 따라 크게 영향을 받을 수 있다. 이러한 영향은 평균 월별 댐 저수량에서 확인할 수 있다 (Fig. 4). 모든 댐들은 2000~2016년 평균적으로 5월과 6월 사이 저수량이 가장 많이 감소하는데 이는 국내 전형적인 몬순기후의 영향으로 봄철 강수량이 적어 댐 유입량이 적은 것이 주요 원인으로 판단된다. 이와 같이 월별 댐 저수량 결과에 근거하였을 때 국내 댐 저수량은 자연적인 유입과 인위적인 유출에 의하여 결정되며 수열에너지 공급을 위한 댐 용수는 인위적인 유출에 추가될 것이다. 그러나 댐 주변에 수열에너지 댐 용수를 공급하고 댐으로 다시 회수된다면 수량 측면에 있어서는 저수량에 영향을 미치지 않을 것이다. 이러한 경우 또 다른 문제가 발생할 수 있다. 냉방용으로 공급되는 저온의 댐 원수는 수온이 증가한 상태에서 댐으로 회귀해 댐 수온을 높여 냉방용 수열에너지의 건전성을 저하시킬 수 있으며, 난방용으로 공급되는 고온의 댐 원수

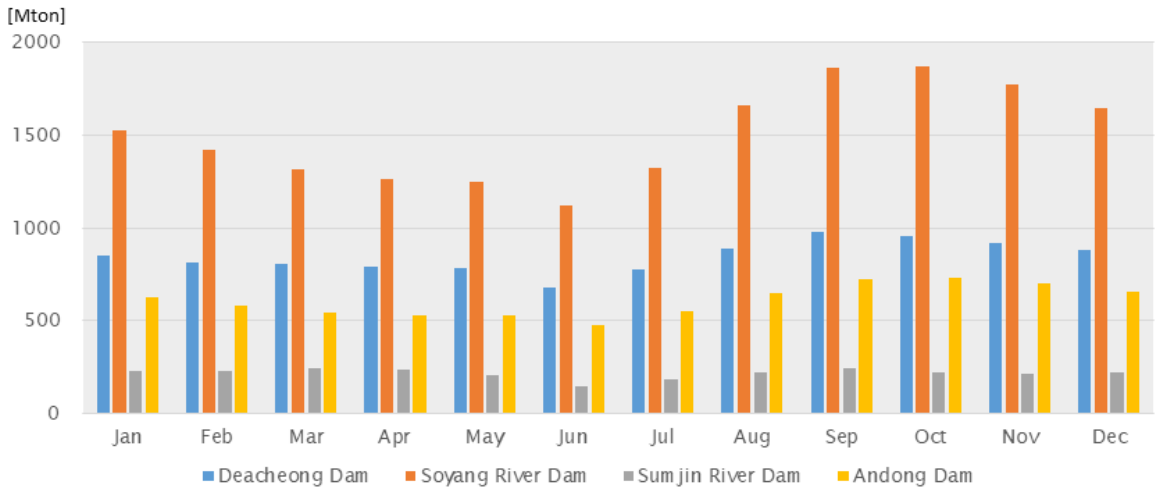
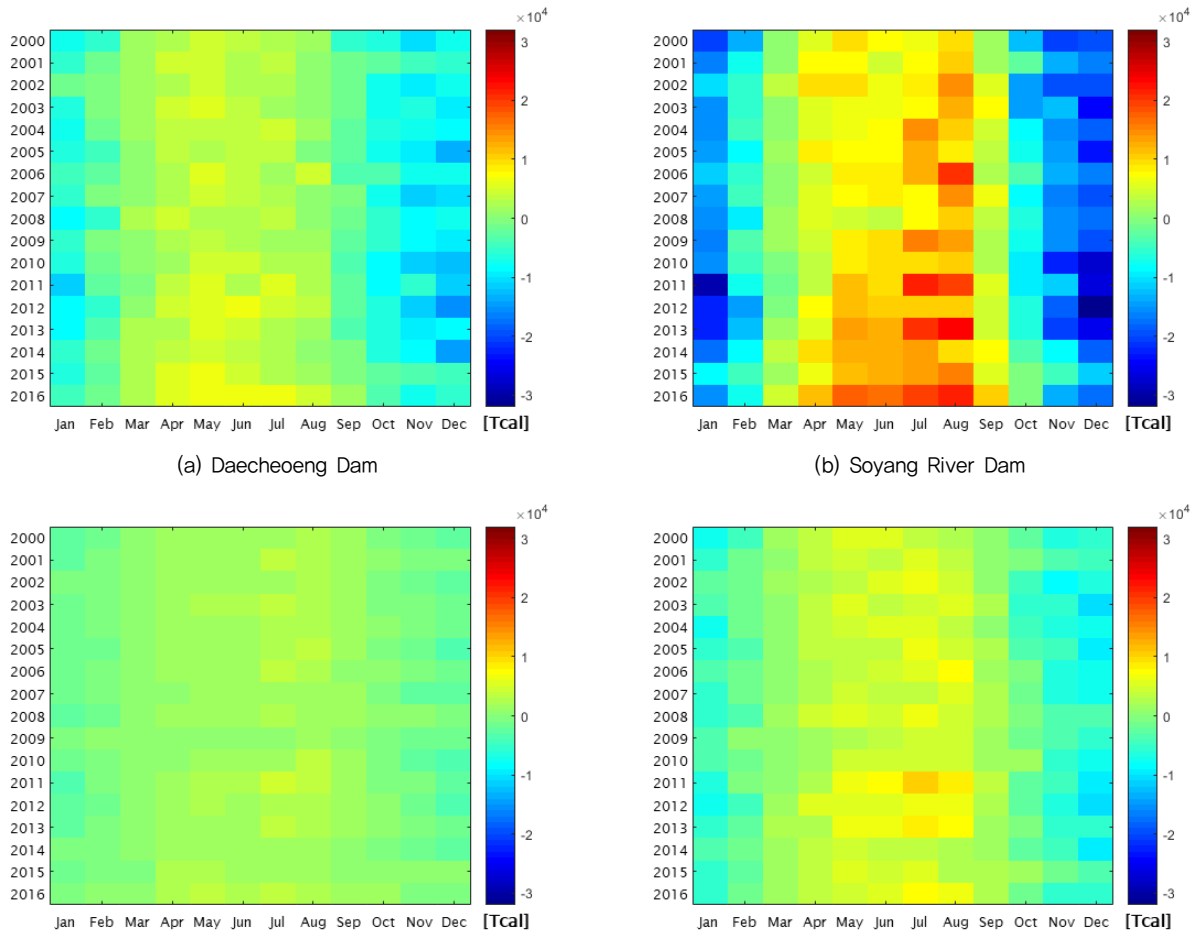


Fig. 4 2000~2016 average monthly dam water storage

역시 수온이 낮아진 상태에서 회수되어 난방용 수열에너지에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 이러한 저수량 분석은 추후 댐의 수온과 저수량에 영향을 적게 줄 수 있는 방안을 찾는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 댐별 가능최대 수열에너지량 산정

본 연구에서는 댐별 수열에너지를 2000년부터 2016년까지 월별 수열에너지를 산정하여 매트릭스의 형태로 나타내었다 (Fig. 5). Fig. 5에서 양의 값은 냉방용 수열에너지를 나타내며, 음의 값은 난방용 수열에너지를 의미한다. 산정된 연도별 월별 수열에너지를 분석한 결과 소양강댐이 가장 큰 가능최대 수열에너지 분포를 보였으며, 섬진강 댐이 가장 작은 가능최대 수열에너지 분포를 나타내었다. 특히, 극심한 가뭄이 있었던 2015년에는 모든 댐에서의 수열에너지가 다른 연도에 비해 상대적으로 작았다. 냉방용 가능최대 수열에너지는 대청댐 (2016년 7월 6,898 Tcal), 소양강댐 (2013년 8월 23,716 Tcal), 섬진강댐 (2011년 7월 4,237 Tcal), 안동댐 (2011년 7월 10,022 Tcal)으로 산정되었다. 반면 난방용 가능최대 수열에너지는 대청댐 (2012년 12월 15,251 Tcal), 소양강댐 (2012년 8월 31,008 Tcal), 섬진강댐 (2012년 12월 3,392 Tcal), 안동댐 (2012년 12월 10,164 Tcal)으로 산정되었다. 대청댐의 경우 8월에 저수량이 많음에도 불구하고 수열에너지량이 매우 적게 산정되었는데 (8월 평균: 1,595 Tcal) 이는 대기온도와 수온의 차 (0.02° C)가 매우 작은 것이 주요한 원인이다 (Fig. 2a). 이는 대청댐이 다른 댐과 비교하였을 때 상대적으로 여름철 수온이 더 높게 증가한다는 것을 의미하기도 한다. 이러한 현상은 대청댐을 포함한 다른 댐에서도 나타나는데 주로 계절이 바뀌는 3월 4월 사이와 9월 10월 사이에 자주 발생한다. 이는 산정된 2000~2016 평균월별 가능최대 수열에너지의 결과에서도 확인할 수 있다 (Fig. 6). 이러한 결과로부터 섬진강댐과 안동댐은 냉방용 에너지를 공급할 때 더 유리한 수열에너지를 내재하고 있으며, 대청댐과 소양강댐은 난



(a) Daecheoeng Dam

(b) Soyang River Dam

(c) Sumjin River Dam

(d) Andong Dam

Fig. 5 Matrix of 2000~2016 monthly dam water thermal energy

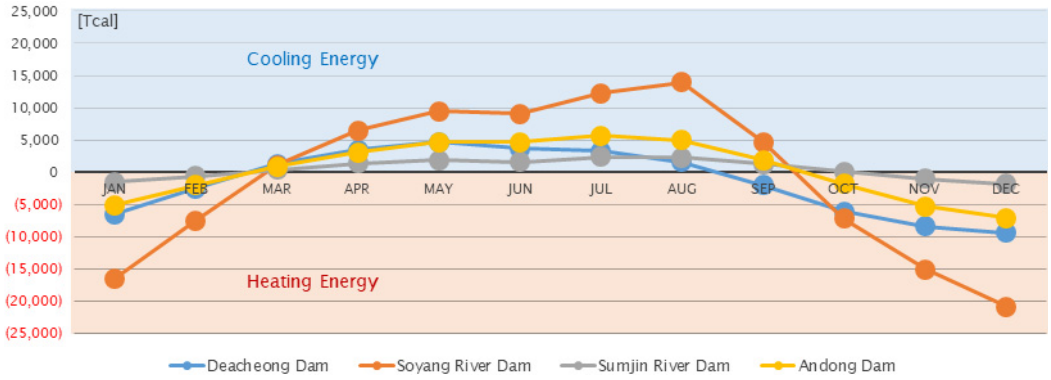


Fig. 6 2000~2016 average monthly dam water thermal energy

방용으로 더 활용할 수 있는 수열에너지를 보유하고 있다. 특히, 무더위가 발생하는 7월에서 9월 사이 대청댐은 안동댐보다 더 큰 저수용량을 가지고 있음에도 불구하고 냉방용 수열에너지의 공급능력은 덜한 것으로 분석되었다. 앞에서 나온 결과와 마찬가지로 평균 월별 수열에너지는 소양강댐이 가장 크고 섬진강댐이 가장 작았다. 또한, 댐의 저수용량과 상관없이 3월과 4월 사이 그리고 9월과 10월 사이 가능최대 수열에너지는 작은 온도차에 의하여 비슷하게 산정되었다.

본 연구에서는 실질적으로 사용할 수 있는 수열에너지를 산정한 것이 아니라 월별 댐 저수량에 대한 가능최대 수열에너지를 산정하였다. 따라서 에너지수요가 있는 곳의 특성에 맞추어 냉방 혹은 난방용 에너지를 공급에 대한 댐의 역할이 달라질 수 있으며, 가능최대 수열에너지는 저수량에 근거하였기 때문에 댐 운영에 따른 실질적인 에너지회수율에 비하여 과대산정된 값이며 히트펌프에 따라 이용가능 수열에너지의 양은 변할 수 있다. 수열에너지를 활용할 경우 실질적인 댐 운영에서는 방류량에 수열에너지에 이용되는 댐용수도 포함되어야 한다. 댐 수원을 이용하여 수열에너지를 공급할 때 댐의 방류량에 영향을 주고 이 방류량은 연쇄적으로 저수량에 영향을 주어 공급 가능한 수열에너지가 줄어들 수 있다. 또한, 다른 목적의 용수를 안정적으로 공급하기 위해서 각 댐에서는 어느 특정 저수량을 보유해야 하므로 실질적으로 이용가능한 수열에너지는 본 연구에서 산정된 가능최대 수열에너지보다 훨씬 작을 것으로 예상된다. 현재의 댐 운영 상황아래 댐 방류량에 의한 수온의 차이로 댐 하류지역의 환경문제가 대두되는 곳에 기존 방류되는 용수를 대신 댐 주변에 수열에너지로 활용된 용수를 방류한다면 기존 댐 저수량을 유지하면서 수열에너지를 활용하고 하류하천에 환경적 왜곡을 저하시킬 수 있는 하나의 방안이 될 수 있을 것이다. 실질적으로 이용가능한 수열에너지를 산정하고 잘 활용하기 위해서는 본 연구에서 다룬 월별자료보다 시간해상도가 높은 자료와 함께 수열에너지에 영향을 줄 수 있는 히트펌프의 효율과 열교환기의 성능, 댐운영 룰 등과 같은 인자들을 고려해야할 것이다.

이러한 수열에너지는 일정 온도를 유지하여 계절과 관계없이 농업용 시설재배와 같은 곳에 기여할 수 있다. 특히, 댐 주위의 시설재배에서는 수열에너지를 공급하기 위한 설치비용이 적게 들 수 있기 때문에 시설재배에 더 유리할 수 있다. 시설재배 유지비 가운데 많은 부분이 에너지공급에 치중되기 때문에 수열에너지의 활용은 이러한 농민들에게 경제적 이익을 가져다 줄 수 있다. 실질적으로 주암댐 하류에서는 주암댐에서 방류되는 저온수를 이용하여 시설재배에 냉방에 활용되고 있다. 이러한 점을 고려했을 때 수열에너지는 그동안 많이 활용되지 않았던 에너지를 농업생산에 활용함으로써 연안인접지역에 집중되어 있던 시설재배단지를 댐 주위로 그 설치범위를 넓힐 수 있는 기회를 제공할 수 있다. 또한 농민들의 경제적 부담을 줄여 영농활동의 활성화에 기여할 것으로 기대한다.

Ⅳ. 결 론

본 연구는 물-에너지 넥서스의 접근방법가운데 하나로 댐에 잠재되어 있는 월별 가능최대 수열에너지를 산정하였다. 수열에너지는 이미 오래전부터 연구되기 시작했으나 국내에는 연구가 활발히 이루어지지 않은 상태이다. 국내 해수, 하천수, 하수처리시설, 지하수열, 농업용 저수지에 대한 연구는 수행되었으나, 국내 지표수를 가장 많이 보유한 댐을 대상으로 한 수열에너지 연구는 없었다. 본 연구는 국내 최초로 댐을 대상으로 수열에너지를 산정하여 댐이 보유한 수열에너지의 양과 특성을 분석했다는 것에 의미가 있다고 할 수 있다.

국내 4대강 수계에서 가장 큰 저수용량을 가진 댐들에 대하여 산정된 가능최대 수열에너지를 월별로 난방용 혹은 냉

방용으로 사용할 수 있는 용도가 달랐으며, 특히 3월과 4월사이, 9월과 10월사이 대기와 댐수원의 작은 온도차로 인하여 가능최대 수열에너지는 작게 산정되었다. 또한, 댐의 특성에 따라 대청댐과 소양강댐은 난방용 수열에너지 공급에 유리하였으며, 섬진강댐과 안동댐은 냉방용 수열에너지 공급에 유리하였다. 수열에너지 산정에 있어 대기와 댐수원의 온도차는 월별 수열에너지 편차에 큰 영향을 주었으며, 저수량은 연평균 수열에너지 편차에 주 영향을 미쳤다.

본 연구에서 평균 월별 저수량, 수온 자료를 이용하여 산정된 가능최대 월별 수열에너지는 실질적인 댐 운영에 포함되기에는 제한이 있다. 댐 수온은 상층, 중층, 하층에 따라 그 온도가 많이 차이가 나지만 월별 저수량에 대한 수열에너지를 산정하였기 때문에 평균 온도를 사용하였다. 또한, 자료의 제약으로 인하여 시간별 댐 수온을 사용하지 못한 것 또한 본 연구의 한계라고 할 수 있다. 추후 시간해상도가 높은 자료, 댐 운영정보, 히트펌프의 성능정보, 댐 상층, 중층, 하층에 대한 온도분포의 자료가 이용가능하다면 보다 현실적인 댐 운영에 수열에너지 부분이 포함되어 활성화될 수 있을 것으로 생각한다. 본 연구의 댐별 수열에너지의 특성분석은 에너지공급이 필요한 산업단지, 시설재배단지와 같은 댐 주변 국토개발계획에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가 수열에너지의 활용은 댐의 역할과 기능을 확대할 뿐만 아니라 수자원의 활용성과 가치를 높여 물-에너지-식량 넥서스를 실현하는데 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음 (No. 2017R1C1B5075791).

REFERENCES

1. Chen, X., G. Zhang, J. Peng, X. Lin, and T. Liu, 2006. The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China, *Appl. Therm. Eng.* 26: 2255-2261. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.009
2. Kavanaugh, S. P., 1989. Design considerations for ground and water source heat pumps in southern climates, *ASHRAE Trans.* 95(1): 1139-1149.
3. KEMCO, 2016a. New & Renewable Energy Statistics 2015, Korea Energy Agency, Korea.
4. KEMCO, 2016b. Industry Statistics of New & Renewable Energy 2015, Korea Energy Agency, Korea.
5. KIER, 2005. The Optimization of Demonstration Network Plant Using Unutilized Energy Resources, 6-116. Ministry of Science and Technology, Korea.
6. Kim, J., Y. Ryoo, and M. Park, 2015. Analysis of Available Capacity and Relevant Legal System for the Use of Temperature Difference Energy in a Rural Community. *New & Renewable Energy*, 11(3): 21-27 (in Korean).
7. Kindaichi, S., D. Nishina, L. Wen, and T. Kannaka, 2015. Potential For Using Water Reservoirs As Heat Sources In Heat Pump Systems, *Applied Thermal Engineering*, 76: 47-53. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.10.091
8. Mitchell, M. S., and J. D. Spitler, 2013. Open-loop direct surface water cooling and surface water heat pump systems - A review, *HVAC&R Res.*, 19: 125-140. DOI: 10.1080/10789669.2012.747374
9. Park, J. T., and K. C. Chang, 2002. An Investigation on Quantity of Unused Energy Using Temperature Difference Energy as Heat Source and Its Availability, *Korean Energy Engg. J.*, 11(2): 106-113
10. Peer, T., and W. S. Joyce, 2002. Lake-source cooling, *ASHRAE J.* 44(4): 37-39.
11. Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. III. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. A. Foley, 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461: 472-475. doi:10.1038/461472a
12. Takeshi, K., T. Hiroo, and M. Hisashi, 1993. Possibility of Utilization of River Water as the Heat Source/Sink of Heat-Pump Systems: Part I. I*n Proceedings of the Annual Conference of Architectural Institute of Japan*, 499-500. Tokyo, Japan.