Crisisonomy Vol.14 No.4, 41-53
ISSN 2466-1198 (Print) ISSN 2466-1201 (Online) https://doi.org/10.14251/crisisonomy.2018.14.4.41
© 2018 Crisis and Emergency Management : Theory and Praxis. All rights reserved.

Crisisonomy

Effects of Energy and Food Supply on Domestic Water Demand

- Elasticity Estimation Using Panel Data Model -

Hee Kyun Oh#, Hee Chan Lee+

Department of Hospitality and Tourism Management, Sejong University, 209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

Abstract

The aim of this study was to obtain basic information related to WEF (water-energy-food) Nexus for water shortage crisis management by analyzing the influence of energy and food supply on domestic water demand. This study set up a panel model reflecting regional heterogeneity, using the data from 16 metropolitan cities in Korea during the past 17 years (1998 to 2014). The model included multiple variables such as water nexus factors (energy consumption and food crop production), climate factors (precipitation and temperature), and economic factors (GRDP and water rate). The FGLS (feasible generalized least squares) model was selected as the optimal option as a result of the model fitness test. The model results indicate that energy consumption, food crop production, GRDP and water rate all showed significant influence on water demand, but precipitation and temperature were not effective. The elasticity of water consumption was 0.084 for energy consumption, 0.412 for food crops, 0.318 for GDRP, and -0.199 for water rate.

Key words: climate change, panel data model, water demand, water-energy-food (WEF) nexus

Ⅰ. 서 론

물은 대체재가 거의 존재하지 않는 매우 한정된 자원임에 따라, 현재 국내의 수자원 관리 정책은 제한된 물의 효율적 분배와 효과적인 가용 수자원 활용 방안에 주안점을 두고 있다(Seo, *et. al.*, 2011). 국내의 물 수요량은 인구 증가, 경제 성장, 도시화 등의 생활환경 변화에 의해 지속적으로 증가하는 가운데, 가뭄 및 홍수 등의 기후변화 영향으로 물 부족 위기 상황이 초래될 수 있다는 시나리오가 속출하고 있다(MOLIT, 2015).

이러한 물 수급 위기관리와 관련하여, 최근 전 세계적으로 논의되고 있는 주제 중 하나가 물-에너지-식량(Water-Energy-Food Nexus) 연계성이다. 세 자원 간에는 상호 상충관계(trade-off)가 성립되는데, 에너지 생산(예: 냉각수, 플랜트 설비 등)을 위해서는 수자원이 소모되며, 소비자를 위한 최종에너지 공급 시에도 이를 발굴・처리・변환하는 과정에서 물이 소비된다(Kim, 2016). 또한, 식량 생산에 있어, 물은 농업을 지탱하는 기초적이고 필수적인 자원이며, 식량의 재배 및 공급을 위해서도 다량의 수자원이 이용된다(Lee &

The 1st author: Hee Kyun Oh, Tel. +82-2-3409-5174, Fax. +82-2-3409-5174, e-mail. ohheekyun@sejong.ac.kr
+ Corresponding author: Hee Chan Lee, Tel. +82-2-3408-3183, Fax. +82-2-3409-5174, e-mail. leeheech@sejong.ac.kr

www.kci.go.kr

Choi, 2015).

국내의 경우, 인구 증가에 따른 에너지 소비량과 식량 생산량의 증가가 물 공급 위기 상황을 유발할 수 있다는 의견도 있으며(Ryu, 2017), 이러한 물-에너지-식량 수급의 위기상황은 국제적인 동향일 뿐, 해외 의존도가 높은 국내의 에너지-식량 수급 여건에는 다르게 적용될 수 있다는 관점(Jung, 2015)도 있어 잠정적인 결론만이 지속되고 있다. 이러한 견해의 불일치는 증거의 부재에 기인한 것으로 보이는데, 아직 물-에너지-식량 연계성에 관한 연구는 개념과 필요성을 피력하는 초기 단계일 뿐, 구체적으로 실증 분석된 사례는 미비하기 때문이다(Kim, 2016).

더불어, 효율적인 수자원 이용과 배분을 위해 선행되어야 하는 것이 물 사용량에 대한 예측이며, 무엇보다 장기적인 수자원 수요 예측에서 요구되는 것이 예측의 타당도와 정확도, 안정성일 것이다(Koo, *et. al.*, 2005). 예측된 결과는 막대한 비용이 투입되는 상수도 시설의 위치와 용량 설정에도 결부되는데, 수요의 과다·과소 추정 오류는 환경 훼손 등의 사회적 비용 증가와 산업 활동의 위축, 국민 편익 감소를 발생시킬 수 있다는 점에서도 예측의 중요성이 강조되고 있다(Kim & Kim, 2010).

물 관련 선행연구를 살펴본 결과, 공급 측면의 수문학적 인자(예: 유출량, 담수량, 지하수 등) 분석이 주류를 이루고 있으며, 간헐적으로 가정용수(Kim & Han, 2007; Myoung, *et. al.*, 2011), 생활용수(Kwak & Lee, 2002), 공업용수(Min, 2005) 등의 수요추정 연구가 수행되어왔다. 하지만 물 수요에 대한 비기후적 인자의 영향력을 감안할 시(IPCC, 2008), 이는 실로 미흡한 실정이라 할 수 있다. 물 수요 분석에 대한 중요성은 매 시점 강조되고 있으나, 구체적인 시사점을 발견하기 위해서는 더 많은 연구가 축적될 필요가 있을 것이다(Kim & Han, 2007).

본 연구는 수자원과 사회·경제적 변수 간의 관계가 중시되는 현시점에서, 물 수요에 대한 에너지 및 식량 공급의 영향력과 주요 통제변수의 효과를 검증하고 물 부족 위기 대응을 위한 분석정보를 도출하고자 한다. 물-에너지-식량 연계성과 관련된 기초 자료를 확보하는 일은 시의적절한 연구 주제로서 가치가 있다고 사료되며, 또한 지금까지의 물 수요 분석이 각기 다른 연구의 범위 내에서, 상이한 변수, 추정모형, 분석 시점과 자료에 기초해 도출된 결과들이므로 이에 대한 연구는 계속해서 보완될 필요가 있다고 판단하였다.

본 연구의 분석은 공간적·시간적 이질성을 통제할 수 있는 패널자료 모형을 토대로 수행될 것이다. 이는 물 수요 패턴이 안정화되기 시작한 시점(1997년)부터 현재를 포괄한다는 점과(Kim & Han, 2007) 기후 조건과 사회·경제 요인의 지역 간 이질성(Kim & Kim, 2010)을 반영할 수 있다는 점에서 분석방법의 타당성을 지닌다. 구체적으로, 정량 자료가 체계적으로 수집되기 시작한 1998년부터 2014년까지 17년간의 자료를 바탕으로, 전국 16개 시도별 수자원 이용량과 물 연계(nexus) 요인(에너지소비량, 식량작물생산량) 및 사회·경제적 요인(지역내총생산, 수도요금), 기후요인(강수량, 기온) 자료를 활용하여 패널자료 모형을 구축하고 국내 용수 이용량의 결정요인과 탄력성을 도출할 것이다.

II. 이론적 검토

1. 물 수요와 에너지 및 식량 공급 간의 관계

본 연구는 물 수요함수의 설정을 위해, 에너지 및 식량 공급요인을 중심으로 물 이용량에 영향을 미치는 주요 통제 인자를 탐색하였다. 독립-종속 변수 간의 인과관계 확인과 패널 모형 적용의 적합성 여부 판단에 주안점을 두고 기존 문헌 및 정보를 검토한 결과는 다음과 같다.

먼저, 에너지 생산 시에 기본적인 수자원 소모량이 발생하며, 소비자에게 에너지를 공급하기 위해 이를 발굴하고 처리·변환하는 과정에서도 물이 소비된다(Kim, 2016). 에너지 이용에 따른 물 발자국을 규명한 결과, 물 소비는 전기 생산을 비롯하여 화력발전소의 냉각수, 수력발전, 광물 채굴 및 광업, 연료 생산, 배출

www.kci.go.kr

량 제어 시 일어나게 된다(Nguyen, 2015). 또한, 물의 종류(담수, 염수, 폐수 등)와 물의 용도(공정수, 상수 냉각수 등)에 따라 에너지 소비량에 차이가 발생하는데, 특히 담수화(소금기가 섞인 물에서 염분을 제거하는 과정)를 위해서는 더욱 많은 에너지가 소모되며, 그 밖에도 최종소비 시 물 가열이나 세탁 시에도 에너지가 이용된다(Kim, 2016). 이는 각 지역의 인구수와 산업단지 규모에 따라 공업용수 이용량에 차이가 존재함을 의미하는 대목이다.

무엇보다, 인구증가와 경제성장은 에너지 소비량에 정(+)의 영향을 미치므로(Lee, 2012), 이에 수반되는 물 수요량이 시계열적으로 가중되었을 것이고, 소득수준과 에너지소비량 간의 연관성에 따라 지역 간 차이가 유발되었을 것이다(Seo, *et. al.*, 2012). 이와 같이 물-에너지 간의 연계성이 공간적·시간적으로 상이하다는 점은 지역 간 격차가 고려된 패널자료의 이용이 적합하다는 것을 보여준다.

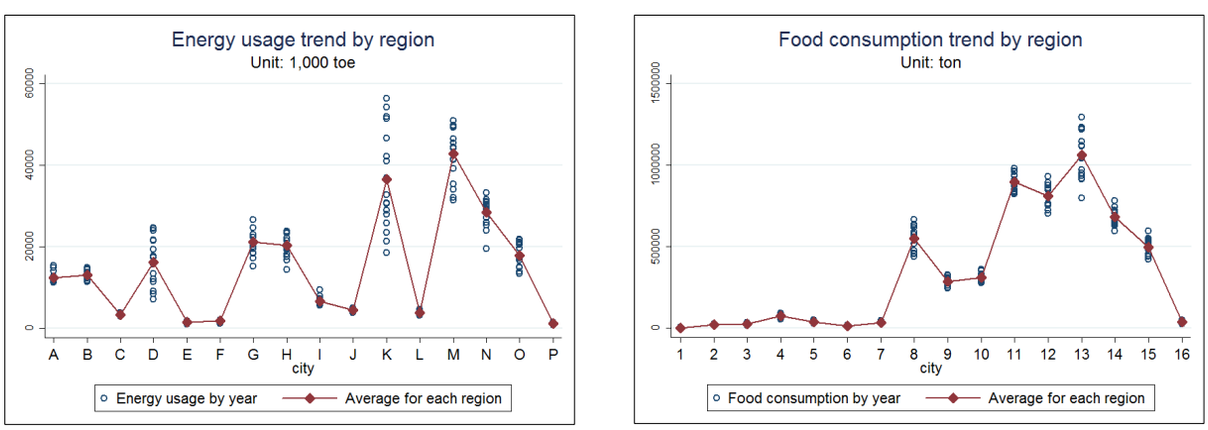
식량 수급 역시 물 수요와 밀접한 연관성을 지니고 있다. 식량이 인간 생존에 필수재라면, 농업용수는 식량 생산과 농업 유지를 위한 기초차원이 된다(Lee & Choi, 2015). 식량 생산량과 농업용수 간의 수급 관계는 식량 소비패턴에 따라 변화될 수 있는데, 최근 인구증가에 따른 식량 생산량 확보 문제와 농업용수 증가 현상은 전 지구적 주요 사안이 되고 있다(Ryu, 2017).

식량 공급 관련 지표의 활용도는 과거 농업용수 결정요인 연구에서도 다수 발견되고 있다. 수자원 이용량은 토지사용 변화에 영향을 받으며(Lee, 2012) 경지면적과 농업용수 수요 간에는 정(+)의 인과관계가 존재한다고 하였다(Ryu, 2015; Wang, *et. al.*, 2011). 따라서 물 수요에 대한 식량 수급의 영향력은 경지면적 및 토지이용 변수와 동일한 맥락에서 해석될 수 있을 것이다. 식량 생산량 역시 지역 간에 차이가 있으며, 인구증가, 경제발전 등의 선행요인을 통해 시계열적으로 증가해 왔다는 점에서 패널자료 모형의 적용이 합당하다고 판단된다.

다음 〈Figure 1〉은 에너지와 식량 자원에 관한 기술통계이다. 1차 에너지소비량의 경우, 지역 간 및 연도 간 차이가 가시적으로 드러나고 있으며, 식량작물 생산량에서는 연도 간 차이에 비해 지역 간 편차가 두드러지게 나타나고 있다. 이러한 양상은 패널자료 모형을 적용하고자 하는 본 연구의 방향에 선험적으로 부합되는 결과이기도 하다.

2. 기본적인 물 수요 결정요인

물 수요 함수 모형의 설정 시, 기본적으로 투입되어야 할 통제변수를 파악하기 위해 선행연구를 검토한 결과는 다음과 같다. 먼저, 가격 및 소득 변수와 관련하여, Kim(1996)의 연구에서는 15개 시·도 자료를 바탕



*Notes: City Number: Seoul=1, Busan=2, Daegu=3, Incheon=4 ,Gwangju=5, Daejeon=6, Ulsan=7, Gyeongi=8, Gangwon=9, Chungbuk=10, Chungnam=11, Jeonbuk=12, Jeonnam=13, Kyungbuk=14, Gyeongnam=15, Jeju=16

※ Source: Yearbook of regional energy Statistics(Korea Energy Economics Institute) & Agricultural Production Statistics(National Statistical Office)

Figure 1. Spatial and temporal trends in energy and food resources

www.kci.go.kr

으로 연도별 전국 상수도 수요함수를 설정하였으며, 가격탄력성 0.01, 소득탄력성 0.444가 도출되었다. Kim & Han(2007)은 서울시 가정용 생활용수의 가격탄력성과 소득탄력성의 추정을 위해 1997년부터 2004년까지의 상수도 통계자료를 사용하였으며, Stone-Geary 모형을 적용해 0.16의 가격탄력성과 0.24의 소득탄력성을 산출하였다.

Park & Choi(2006)는 생활용수의 가격탄력도를 추정하고자 6년(1997년~2003년)에 걸친 전국 176곳의 지자체 자료를 활용하였으며, 분석 결과 수도요금 10% 인상 시 수요량이 0.5% 감소하였는데, 이는 수요량 절감에 대한 수도요금 인상의 정책적 효과가 미비한 것이라고 해석하였다. Ryu & Jang(2012)의 연구에서는 1992부터 2010년까지의 광역 상수도 수요함수가 추정되었는데, 시계열 자료의 불안정성에 대해 단위근 검정 및 공적분 검정을 사용한 결과, 가격탄력도는 0.159, 소득탄력도는 0.463이었다. 또한, Park, *et. al.*(2014)은 물 재이용 활성화를 위한 결정요인 분석을 위해 수원시민을 대상으로 설문조사를 시행하였으며, 물 이용에 영향을 미치는 요인으로 수도요금, 기후변화, 환경보호 등의 결정인자를 도출하였다.

통합적 물 수요 관리에 대한 해외 연구 사례에서도 중요 인자를 발견할 수 있었다. Wang, *et. al.*(2011)은 미래 도시의 물 수요 관리에 대한 시나리오를 시험하기 위해, 물 수요를 결정하는 주요 지표로서 도시인구, 경작면적, 1인당 물 사용량 등을 적용하였고, Xu, *et. al.*(2002)은 황하 강 유역 물 수요·공급에 영향을 미치는 주요 변수를 파악하기 위해 수자원 시스템다이내믹스 모델을 개발하였는데, 여기서 사용된 물 수요 관련 인자는 인구수, 1인당 물 사용량, 산업체 물 사용량, 경작면적, 어업면적, 축산업 가축 수 등이었다. Qi & Chang(2011)은 도시지역의 장기 물 수요 예측 모형을 구축하기 위해, 1인당 물 사용량, 평균수입, 비고용율 등의 사회·경제 변수 간의 상호작용을 검증하였다. 또한, Xi & Poh(2013)의 연구에서는 싱가포르 물 관리 모델이 개발되었으며, 물 수요의 산정을 위해 사용된 지표는 인구, 경제성장 수준이었다.

더불어, 기후인자는 기본적으로 물 수요에 영향을 미치므로 물 수요 함수 설정 시 필히 통제될 필요성이 있다. 특히, 관개용수량과 관련하여 기온과 강수량, 증발산, 강우 강도는 물 사용의 패턴 변화를 일으키고, 용수 사용량을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Ryu, 2015). 그러나 장기 물 사용량의 변화 추세를 설명할 수 있는 기후적 인자의 결정적 증거자료는 발표되지 못하고 있으며, 수요 결정 강도 면에서도 비기후적 인자의 영향력이 기후인자에 비해 상대적으로 크다고 하였다(IPCC, 2008).

선행연구 검토 내용을 종합한 결과, 본 연구는 물 수요의 결정요인 추정 시 기후요인(강수량, 기온)이 기본적으로 통제되어야 하며, 다수의 연구에서 고려된 가격변수와 경제성장 요인, 그리고 현시점에서 중요성이 강조되고 있는 물 연계 요인(에너지 및 식량 공급)이 투입된 물 수요모형이 필요하다고 판단하였다. 또한, 물 수요는 인구증가에 따른 사회·경제적 요인에 의해 공간적·시간적으로 변화하고 있으므로 패널자료의 사용이 합당하다는 결론을 내렸다. 한편, 인구 관련 요인은 과거에는 인구수를 단일 변수로 하는 수요모형도 존재하였지만, 이는 모든 설명요인의 선행변수가 되므로 다중공선성을 유발할 수 있고, 지역별 특성을 반영하지 못하는 한계(예: 물 수요가 많은 적은 인구의 상업도시)가 있기 때문에(Myoung, *et. al.*, 2011) 분석모형에서 제외하였다.

Ⅲ. 연구방법

1. 분석변수 선정

본 연구는 앞서 선정한 설명변수의 대표성과 정량자료 수집의 현실성을 고려하여 구체적인 지표를 선정하고 연구모형을 설정하였다. 결론적으로, 본 연구의 분석모형은 국내 용수 이용량과 기후요인(강수량, 기온), 물 연계 요인(에너지소비량, 식량작물생산량) 그리고 경제성장요인(GRDP), 가격요인(수도요금) 간의 인과

www.kci.go.kr

Table 1. Preliminary implication of explanatory variables

Factors	Variables	Effect	Meaning of Direction
Climate Factors	PREC	+	Precipitation increment increases the amount of water available and facilitates water supply
	TEMP	+	The rise in temperature leads to an increase of water usage in all sectors
WEF Nexus Factors	ENERGY	+	The trade-off relationship between water and energy resources
	FOOD	+	The trade-off relationship between water and food resources
Socio-economic Factors	GRDP	+	Increase in industrial water and service water due to economic growth
	RATE	−	The law of demand

관계 검증을 위한 다변수함수 모형으로 구축되었으며, 각 변수의 영향력과 이론적 부호를 고찰한 결과는 다음과 같다.

먼저 기후요인의 경우, 강수량 증가는 가용수자원 확보량을 풍부하게 하고, 물 공급을 수월하게 함으로써 물 수요를 증가시킬 것이라 예상되며(Kim & Jeong, 2011), 기온 상승은 음용수, 목욕 용수, 냉각수, 농업용수의 증발산량 등의 증가를 유발함으로 모든 용수의 수요 증가를 야기할 것이라고 판단된다(Ryu, 2015). 따라서 두 변수의 영향력은 모두 정(+)의 방향으로 설정되었다. 또한, 주요 검증 인자인 에너지-식량 공급 요인의 경우, 에너지 소비량 증가와 식량작물 생산량 증가에 따른 물 사용량 증가를 예상할 수 있으므로, 모두 정(+)의 인과방향을 설정하였다(Kim, 2016; Lee & Choi, 2015). 마지막으로, 경제요인 중 GRDP(지역내총생산)는 경제성장 수준을 반영하는 지표이기도 하며, 이 역시 물 이용량을 증가시키는 유의한 영향 인자이므로 정(+)의 인과관계가 예상되며, 수도요금의 경우 물가격이 실효성을 반영하고 있다면 수요 법칙에 따라 부(−)의 관계가 성립되어야 할 것이다(Kim & Han, 2007; Park & Choi, 2006; Park, *et. al.*, 2014). 다음 〈Table 1〉은 설명변수의 구성과 이론적 부호에 대한 함의를 나타내고 있다.

2. 분석자료 수집

분석 자료의 수집을 위해 상대적으로 공신력이 인정된 국가 포털 사이트(국가수자원관리종합정보시스템, 통계청 등) 자료를 이용하였다. 1998년부터 2014년까지의 모든 자료에 결측치가 존재하지 않은 균형 패널자료가 확보되었으며, 다음 〈Table 2〉는 수집된 설명변수의 원 수집단위와 출처에 관한 내용이다.

WATER 변수는 국내 용수 이용량(유효우량 포함)으로서 생활, 공업, 농업용수의 합계로 산정되었으며, 국가수자원관리종합정보시스템 자료에서 추출하였다. PREC와 TEMP 변수는 통계청(원자료: 기상청)에서 제공되는 강수량과 기온 자료로서 16개 시도의 월별 평균 강수량과 기온의 평균치(월수치/12)이다. ENERGY 변수는 시도별 1차 에너지 소비량으로 지역 에너지통계연보(에너지경제연구원) 자료를 사용하였으며, FOOD 변수는 통계청에서 제공하는 시도별 식량작물 생산량 자료를 적용하였다. GRDP 변수는 통계청에서 수집된 행정구역별 지역내총생산 자료이며, RATE 변수는 환경부(상수도통계)에서 제공하는 수도요금 자료이다.

3. 모형 설정

본 연구는 측정 단위가 상이한 각 변수에 대해 더블-

Table 2. Units and sources of variables

Variables	Unit	Sources
WATER	1,000m^3	Water Resources Management Information System
PREC	mm	National Statistical Office (Korea Meteorological Administration)
TEMP	℃	
ENERGY	1,000toe	Yearbook of regional energy Statistics (Korea Energy Economics Institute)
FOOD	ton	Agricultural Production Statistics (National Statistical Office)
GRDP	Million won (2010 Constant Prices)	National Statistical Office
RATE	won	Statistics of Waterworks (Ministry of Environment)

www.kci.go.kr

로그 모형을 적용하여, 해석의 용이성을 높이고 설명변수 각각의 탄력성을 도출해 영향력의 크기를 비교하고자 한다. 구체적인 회귀모형은 아래 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}\ln(WATER_{ij}) &= \beta_{0i} + \beta_{1i}\ln(PREC_{ij}) \\ &+ \beta_{2i}\ln(TEMP_{ij}) + \beta_{3i}\ln(ENERGY_{ij}) \\ &+ \beta_{4i}\ln(FOOD_{ij}) + \beta_{5i}\ln(GRDP_{ij}) \\ &+ \beta_{6i}\ln(RATE_{ij}) + \varepsilon_{ij}\end{aligned} \quad (1)$$

여기서, i는 16개 광역시도, j는 연도이며, WATER는 물 이용량, PREC는 강수량, TEMP는 기온, ENERGY는 에너지소비량, FOOD는 식량작물생산량, GRDP는 지역내총생산, RATE는 수도요금을 의미한다.

4. 분석 방법

본 연구는 수자원 이용량과 관계된 주요 변수를 규명하기 위해 패널데이터모형(panel data model)을 적용할 것이다. 패널 데이터 모형은 시계열 데이터(time-series data)와 횡단면 데이터(cross-sectional data) 분석을 동시에 진행할 수 있으며, 시계열 자료에서 발생되는 추정오차와 지역별 단위에서 발생하는 추정오차를 통제할 수 있기 때문에 자료 유형 중 가장 많은 정보를 얻을 수 있다(Egger & Winner, 2006). 패널 모형의 일반적인 이론 선형모형은 다음과 같은 식 (2)로 표현된다. 여기서, α는 절편, β는 계수, i는 지역, t는 시점, ϵ_{it}는 오차항 ($\epsilon_{it} = \mu_i + \lambda_t + \upsilon_{it}$)을 의미하며, μ_i는 관찰되지 않은 지역 특성효과, λ_t는 관찰되지 않은 시간 특성효과, υ_{it}는 확률적 교란항이다.

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \epsilon_{it} \quad (2)$$

이러한 기본 모형은 오차항의 가정 형태에 따라 임의효과 모형(Random Effect Model)과 고정효과모형(Fixed Effect Model)으로 구분되어 추정될 수 있다. 고정효과모형은 지역 간의 동일한 회귀계수와 상이한 상수항을 가지며, 오차항의 독립성이 가정된다. 반면, 확률효과모형에서는 오차항 자체가 확률변수이므로 시간과 지역 간에 무작위성을 가정하게 된다. 또한, 오차항의 이질적 특성이 지역과 시간 효과에 무관할 경우 합동(pooled)모형이 채택될 수 있다.

최적의 모형을 선정하기 위해서는 다양한 적합성 검사가 요구되는데, 고정효과모형과 합동모형 간의 적합성 진단을 위한 Chow test, 확률효과모형과 합동모형 간의 효율성 검사를 위한 LM(Lagrangian Multiplier) test, 그리고 고정효과모형과 확률효과모형 간의 적절성을 판단하기 위해 Hausman test가 시행되어야 한다. 이와 더불어 패널 모형의 시간 고정효과(time-fixed effect)와 이분산성(heteroskedasticity) 및 자기상관성(auto-correlation) 진단결과를 고려하여 최적 모형을 선별할 것이다. 물 수요 결정요인이 공간 및 시간상으로 복잡하고 다양한 원인에 의해 발생된다는 점을 감안할 때, 부분균형 분석모형 내 외생변수는 필히 통제되어야 할 것이다. 이러한 맥락에서도 패널자료 모형의 필요성이 제기될 수 있다.

Ⅳ. 분석 결과

1. 기초통계량

수요모형의 추정에 앞서 투입변수의 공간적·시간적 패널특성을 분석한 결과는 다음 〈Table 3〉에서와 같다. 제시된 전체(overall) 기초통계량은 총 관측치의 평균과 표준편차를 의미하며, 지역 간(between) 통계치는 패널(16개 시도) 간 평균차를, 지역 내(within) 통계량은 각 지역 내의 연도 간 표준편차를 의미한다. 주요 결과를 살펴보면, 물 이용량, 온도, 에너지 사용량, 식량작물 생산량, GRDP의 경우 지역 간(between) 차이가 지역 내 연도별 시간 편차에 비해 크게 나타난 반면, 강수량과 수도요금의 경우 지역 간 편차보다 연도별 변화 정도가 큰 것으로 확인되었다. 기본적으로 집단 간 이질성이 집단 내 동질성에 비해 높게 나타나, 패널 모형을 적용하는 데에 무리가 없다고 판단된다.

www.kci.go.kr

Table 3. Foundation statistics

Variables (unit)	Category	Mean	S.D.	Min.	Max.
WATER (Billion m^3/y)	overall	18.73	14.51	2.70	48.32
	between		14.89	2.89	43.20
	within		1.30	13.05	24.18
PREC (100 mm)	overall	14.06	3.43	6.74	25.26
	between		1.42	11.42	16.35
	within		3.14	6.33	23.67
TEMP (℃)	overall	13.60	1.26	11.00	17.00
	between		1.21	11.41	16.18
	within		0.48	12.49	15.07
ENERGY (Million toe)	overall	14.51	13.08	0.78	56.31
	between		12.87	1.22	42.86
	within		3.93	-3.44	34.31
FOOD (1,000 ton)	overall	33.41	35.83	0.13	129.54
	between		36.61	0.24	106.18
	within		4.71	7.12	56.77
GRDP (trillion won)	overall	67.72	69.76	6.60	314.60
	between		68.86	9.79	259.22
	within		20.11	-39.52	166.98
RATE (won/m^3)	overall	587.89	130.76	287.00	917.00
	between		75.82	460.47	699.59
	within		108.11	209.42	828.42

*Notes: 1) No. of Obs.: overall=272, between=16, within=17
2) GRDP unit: 2010 constant prices

2. 다중공선성 진단

패널자료 모형에서는 시간 고정효과를 통해 시계열 척도로부터 발생되는 다중공선성 문제를 해결할 수 있으며, 이를 통해 추정 결과가 왜곡되는 것을 감소시킬 수 있다(Ernst, 2001). 따라서 시간 변수에 관련된 다중공선성은 패널 모형 구조에 의해 완화될 수 있는 부분이지만, 설명변수 간 상관성으로 유발되는 다중공선성에 대해서는 별도의 검사가 필요하므로 분산팽창지수(Variance Inflation Factors: VIF)를 산출하였다. 진단 결과, 6개 투입 변수에 대한 VIF값이 모두 10 이하로 나타나 설명변수의 선정에 문제가 없는 것으로 판단된다. 〈Table 4〉에는 설명변수의 다중공선성 검사에 대한 VIF와 공차한계 값이 제시되었다.

3. 모형 추정

본 연구는 최적의 물 수요 결정요인 모형을 도출하기 위해 대안이 되는 합동 선형회귀모형(Pooled OLS), 고정효과모형(Fixed Effect Model: FE), 임의효과모형(Random Effect Model: RE)의 추정 결과를 우선적으로 고찰하였으며, 이는 다음 〈Table 5〉에 제시된 것과 같다. 먼저 모형(1)은 고정 및 확률효과가 없는 합동 선형회귀모형(OLS)으로 시간과 집단의 특성을 반영하지 않고 있다. 결과에 따르면, TEMP, FOOD, GRDP 등이 유의수준 1%에서 정(+)의 효과를 나타냈으며, PREC 또한 유의수준 10%에서 유의한 것으로 확인되었다. 하지만 이때 각 지역 또는 각 연도에 따라 물 이용량 변수의 초깃값이나 오차항이 상이할 수 있으므로, 고정효과모형과 확률효과모형이 동시에 고찰되어야 한다.

Table 4. Detecting multicollinearity using variance inflation factors

Variables	VIF	1/VIF
ENERGY	3.39	0.30
GRDP	2.94	0.34
FOOD	1.76	0.57
TEMP	1.24	0.80
RATE	1.16	0.86
PREC	1.05	0.95
Mean VIF	1.93	

모형(2)는 각 지역의 고유특성이 통제된 고정효과모형으로서, 시간 변수의 영향력만이 반영된 결과를 보여준다. Chow 검정에 따르면, F=263.16, p〈0.01이므로 패널 효과가 반영된 고정효과모델이 합동 선형회귀모형에 비해 더 적합하다는 대립가설이 채택되었다. 계수의 유의성은 FOOD에서만 나타났으며, 물 수요의 탄력도는 0.274%로 비탄력적이었다. 모형(4)에서는 확률효과모형이 추정되었으며, GRDP의 영향력(0.105%)이 유의수준 10%에서 추가로 도출되었다. 모형(1)과의 효율성을 비교하기 위해 LM 검정을 시행한 결과, χ^2(1)=1698.11 p〈0.01로 나타나 패널 효과 적용의 적절성이 재검증되었으며, FE모형과 RE모형의 rho값이 0.977, 0.955라는 점에서도, 시간 불변의 지역 고유 특성효과와 이를 감안한 패널 모형의 타당성이 확인되었다.

더불어, 집단평균 회귀분석을 통해 추정된 모형(3) BE모형에서는 RE모형과 유사한 결과가 도출되었으며,

www.kci.go.kr

Table 5. Model estimation and comparison

	(1) Pooled OLS	(2) FE	(3) BE	(4) RE	(5) FGLS
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
PREC	0.158*	0.011	−0.293	0.022	−0.009
TEMP	0.863***	0.074	0.753	0.046	−0.045
ENERGY	−0.050	0.045	−0.224	0.051	0.084**
FOOD	0.424***	0.274***	0.406***	0.335***	0.412***
GRDP	0.618***	0.012	0.843**	0.105*	0.318***
RATE	−0.115	0.025	1.448	−0.030	−0.199***
CON	−3.993***	9.830***	−12.556***	7.770***	4.305***
F	273.16***	9.74***	12.34***		
χ^2				111.67***	907.20***
$R^2_{w/i}$		0.189	0.007	0.182	
$R^2_{b/w}$		0.691	0.892	0.759	
$R^2_{overall}$	0.858	0.686	0.709	0.752	
σ_u		0.563		0.393	
σ_e		0.086		0.086	
ρ		0.977		0.955	
No. of Obs.	272	272	272	272	272

Time-fixed Effect Test: $F(16, 234)=1.08$, p=0.3764
Chow Test: $F(15, 250)=263.16$, p=0.000
LM Test: $\chi^2(1)=1698.11$ p=0.000
Hausman Test: $\chi^2(6)$ p=0.011

*Notes: ***, **, * indicate significance at 1%, 5%, 10% level

시간 고정효과를 검사한 결과, 모든 연도 간에 유의한 차이가 존재하지 않아 시간 고정의 필요성은 제기되지 않았다($F(16, 234)=1.08$, p=0.3764). 또한, FE모형과 RE모형 간의 적합성을 비교한 Hausman 검정에 따르면, 오차항과 독립변수 간에 상관성을 인정하는 FE모형이 RE모형에 비해 효율성을 지니는 것으로 판정되었다($\chi^2(6)$, p=0.011).

FE모형에서 도출된 계수의 유의성은 예상된 이론적 결과와 전반적으로 부합되지 않고 있었는데, 그 원인은 추가적인 모형진단 검사에서 발견되었다(〈Table 6〉). 패널자료는 시계열적 특성을 내포함으로 집단 내 자기상관이 나타날 가능성이 있는데, Wooldridge 검정 결과 본 패널자료에는 1계 자기상관이 존재하는 것으로 확인되었다($F(1, 15)=33.432$, p〈0.01). 또한, 오차의 등분산성 가정이 충족되지 않는다는 Modified Wald 검정 결과($\chi^2(16)=2044.18$, p〈0.01)로 인해, 자기상관과 이분산성을 반영할 수 있는 대안 모델의 필요성이 제기되었다.

따라서 본 연구는 오차항 분산 추정값이 적용된 가능일반최소자승 회귀(Feasible Generalized Least Squares: FGLS)모형을 통해 물 수요 결정요인을 재추정하였으며, 이를 최적 대안으로 선정하고 최종결론을 도출하였다. 모형(5)의 결과에 따르면, ENERGY, FOOD, GRDP, RATE 변수 모두 유의수준 5% 이내에서 유의한 정(+)

Table 6. Testing homoscedasticity and non-autocorrelation

Wooldridge Test		Modified Wald Test	
F	Prob.	χ^2	Prob.
$F(1, 15)=33.432$	0.0013	$\chi^2(16)=2044.18$	0.0000

www.kci.go.kr

의 영향력을 나타냈다. 물 이용량에 대한 각 변수의 탄력성은 ENERGY=0.084, FOOD=0.412, GRDP=0.318, RATE=-0.199였으며, 수요 법칙 역시 성립됨으로써 법칙타당성도 일부 충족된 결과가 도출되었다. 한편, PREC와 TEMP는 비유의한 것으로 확인되었는데, 이는 장기 물 수요 분석 시 강수량과 기온 효과가 불명확하다는 기존보고와 다르지 않았다.

V. 결 론

본 연구는 물-에너지-식량 연계성(WEF Nexus)에 대한 기초 자료의 확보를 위해, 기후인자와 사회·경제 요인이 결합된 물 수요모형을 구축하고 국내 물 이용량에 대한 에너지 및 식량 공급의 영향력을 실증 분석하였다. 정량 분석 가능 자료가 체계적으로 수집되기 시작한 1998년부터 2014년까지 17년간의 자료를 바탕으로, 전국 16개 시도별 용수 이용량과 물 연계요인(에너지소비량, 식량작물생산량), 기후요인(강수량, 기온), 경제요인(지역내총생산, 수도요금) 관련 자료를 활용하였으며, 이를 통해 시도 간 이질성이 반영된 패널 모형을 설정하였다.

최적 모형을 선별하기 위해, 대안 모델(Pooled OLS, Fixed Effect Model, Random Effect Model, Feasible GSL)에 대한 적합성 검사(Chow 검정, LM검정, Hausman 검정, 시간 고정효과 검정, 자기상관 및 이분산 검정)를 시행한 결과, FGLS(가능일반최소자승) 모형이 최적 대안으로 선정되었으며 이를 토대로 물 수요의 결정요인과 탄력성을 도출하였다. 주요 추정 결과에 대한 해석 및 함의는 다음과 같다.

먼저, 물 연계 요인의 경우, 에너지 및 식량 수급의 효과는 유의수준 5%와 1%에서 각각 도출되었으며, 물 수요의 탄력성은 에너지소비량=0.084, 식량작물생산량=0.412였다. 물-에너지-식량 연계 기술의 확보를 위해 세 자원 간 상호연관성의 충분한 검토가 필요하다는 의견과(Lee & Choi 2015; Ryu, 2017), 국내 상황은 세 자원 간 연계성이 미미하여 국제적 동향과는 거리가 있다는 견해(Jung, 2015)가 엇갈리는 가운데, 본 연구는 비탄력적이지만 유의할만한 인과관계가 존재한다는 것을 밝혀냈다.

또한, 통제변수로서의 경제성장요인과 가격요인 모두 유의수준 1%에서 유의하였으며, 탄력성은 GRDP=0.318, 수도요금=-0.199였는데, 경제성장요인을 소득변수에 비추어 해석해보면, 물 수요의 소득탄력도를 제시한 Kim(1996), Kim & Han(2007), Ryu & Jang(2012)의 연구 결과와 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 즉 경제성장요인은 물 수요량을 증가시키는 결정적 비기후적 인자이며, 이때 물 수요의 민감도는 경제 수준 변동폭에 비해 작다는 것을 의미한다. 가격변수의 경우도, 수요 법칙이 성립되고 비탄력적인 효과가 있다는 점에서 Kim & Han(2007)의 연구(가격탄력도=0.16), Ryu & Jang(2012)의 연구(가격탄력도=0.159) 등 기존 연구와 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 물 수요에 대한 가격효과는 각기 다른 연구의 범위 내에서 상이한 분석 시점과 자료에 기초해 도출된 수치이므로, 물 가격의 실효성 판단을 위해서는 관련 연구가 계속해서 보완되어야 할 것이다.

한편, 기후인자인 강수량과 기온은 비유의성을 나타냈는데, 이러한 결과는 기후인자와 장기 물 사용 변화 간에 결정적인 관련성이 존재하지 않는다는 IPCC(2008)의 보고와도 일치한다. 즉 물 공급의 결정인자로서 강수량과 기온의 중요도는 결정적이지만 수요측면에서의 기후인자는 비기후적 인자에 비해 상대적으로 낮은 연관성을 지닌다는 의미이다.

본 연구는 상충하는 물-에너지-식량 연계성의 견해에 대해, 물 이용량과 에너지 및 식량 수급 간 연계성이 비탄력적이기는 하나 유의한 인과관계가 있으며, 지역적 특성에 따라 차이가 존재한다는 것을 밝혀냈다. 이러한 검증 결과는 향후 WEF Nexus 개념의 이해를 도모하고, 후속 연구 설계에 일조할 기초 정보를 제공했다는 점에서 가치가 있다고 사료된다.

또한, 물 수요에 영향을 미치는 비기후인자의 효과 검증이 중요시되고 있지만, 기본적인 변인(경제성장,

www.kci.go.kr

물 가격 등)의 영향력 및 탄력성 관련 정보는 부족한 상황이었다. 기존 연구들은 용수별 추정 결과를 제시하고는 있으나 정작 분배 관점의 총 수자원 수요 결정 모형은 부재이므로, 기후인자를 비롯한 사회·경제 요인의 영향력을 동시 비교하기 어려운 실정이었다. 이에 본 연구는 총 수자원을 중심으로 차별화된 수요모형을 구축하였으며, 분석결과에 제시되었듯이 탄력성의 크기는 식량작물생산량〉GRDP〉수도요금〉에너지소비량 순이었다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 먼저, 2차 자료를 활용함에 있어 수집 가능한 자료에 제약이 따라 시도별 분석 단위를 이용해야만 했다. 지역 내 세부 자료가 존재한다면, 더욱 정밀한 분석이 가능할 것이라 예상되므로, 향후 연구에서는 1차 자료 수집 또는 제3의 정보원을 통한 패널자료로 연구가 수행되기를 기대해본다. 또한, 본 연구에서 도출된 요인의 영향력을 개별 용수에 대해 확장하여 해석하는 데에는 무리가 있다. 즉 농업용수, 공업용수, 생활용수 수요량에 대한 세부적인 결정인자는 총 용수 결정요인과 일치되지 않을 수 있으므로, 후속 연구에서는 용수별로 물-에너지-식량 간 관계를 검증해주길 바란다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

Egger, P. and H. Winner. 2006. How corruption influences foreign direct investment: A panel data study. *Economic Development and Cultural Change*. 54(2): 459-486.

Ernst, H. 2011. Patent applications and subsequent changes of performance: Evidence from time-series cross-section analyses on the firm level. *Research Policy*. 30(1): 143-157.

IPCC. 2008. *Climate change and water: IPCC Technical paper VI*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jung, Woo Jin. 2015. Acceleration of energy, food and water anxiety: Responding to market expansion and technology development. *Future Horizon*. (23): 16-19.

Kim, Chong Won and Dong Geun Han. 2007. Demand for residential water in Stone-Geary model. *Environmental and Resource Economics Review*. 16(4): 781-802.

Kim, Ha Na. 2016. Sustainable water and energy management: The study of laws and policies in the U.S. and S. Korea from the perspective of the energy-water nexus. *Environmental Law and Policy*. 16: 101-131.

Kim, Hong Bae and Jae Koo Kim. 2010. Forecast of regional water demand in Korea: A recursive multi-region water CGE modeling approach. *Journal of the KRSA*. 26(1): 85-101.

Kim, Kwang Im. 1996. *Policy direction reflecting the forecast of water supply demand: Development of water demand model*. Korea Environmental Technology Research Institute.

Kim, Yeon Ju and Eun Seong Jeong. 2011. Water resources: Their current state and assessment. Korea Environment Institute.

Koo, Ja Yong, Myung Jin Yu, Shin Geol Kim, Mi Hee Shim, and Koizumi Akira. 2005. Estimation of long-term water demand by principal component and cluster analysis and practical application. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 27(8): 870-876.

Kwak, Seung Jun and Chung Ki Lee. 2002. Estimating the demand for domestic water in Seoul: Appilcation of the error correction model. *Environmental and Resource Economics Review*. 11(1): 81-98.

Lee, Sang Hyun and Jin Yong Choi. 2015. Trends of water-energy-food nexus in view of sustainable development and food security. *Water for future*. 48(11): 32-41.

Lee, Sang Sin. 2012. *Impact of water resources on climate change*. Climate Change Research Institute of Korea.

Min, Dong Ki. 2005. Estimating the demand for industrial water and the pricing policy. *Environmental and Resource Economics Review*. 14(2): 475-491.

MOLIT. 2015. *Water for the future*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Myoung, Sung Min, Doo Jin Lee, Hwa Soo Kim, and Jin Nam Jo. 2011. A comparison of statistical prediction models in household water end-uses. *The Korean Journal of applied*

www.kci.go.kr

Statistics. 24(4): 567-573.

Nguyen Bruno. 2015. *WEF nexus strategy and plan of UNESCO-IHP, water-energy-food nexus international conference FKI conference center*. Seoul, Oct 6 2015.

Park, Doo Ho and Han Joo Choi. 2006. Panel estimation of price elasticities on residential water demand in Korea. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*. 20(4): 527-534.

Park, Hyun Ju, Chung Il Kim, and Moo Young Han. 2014. Determinant factor analysis for the spread of water reuse. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 36(4): 271-276.

Qi, C. and N. B. Chang. 2011. System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. *Journal of Environmental Management*. 92(6): 1628-1641.

Ryu, Jae Na. 2015. *Review of water budget management methods using causal loop*. Korea Environment Institute.

Ryu, Mun Hyun and Seok Won Jang. 2012. A study on estimating demand elasticity for multi-regional waterworks. *Proceedings of Korean Society of Water And Wastewater Symposium*. 254-255.

Ryu, Mun Hyun and Seok Won Jang. 2017. Socio-economic policy agenda for water-food-energy nexus. *Journal of Water Policy and Economy*. 28: 71-85.

Seo, Hyun Cheol, Won Hwa Hong, and Gyeong Mok Nam. 2012. Characteristics of electric-power use in residential building by family composition and their income level. *Journal of the Korean Housing Association*. 23(6): 31-38.

Seo, Jae Seung, Dong Ryul Lee, Si Jung Choi, and Seong Kyu Kang. 2011. A study of water budget analysis according to the water demand management. *Korean Society of Environmental Engineers*. 33(11): 797-803.

Wang, X. J., J. Y. Zhang, J. F. Liu, G. Q. Wang, R. M. He, A. Elmahdi, and S. Elsawah. 2011. Water resources planning and management based on system dynamics: A case study of Yulin city. *Environment, Development and Sustainability*. 13(2): 331-351.

Xi, X. and K. L. Poh. 2013. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *2013 Conference on Systems Engineering Research*. 16: 157-166.

Xu, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira, and X. W. Zhang. 2002. Sustainability analysis for Yellow river water resources using the system dynamics approach. *Water Resources Management*. 16(3): 239-261.

Korean References Translated from the English

곽승준, 이충기. 2002. 서울시 생활용수 수요 추정: 오차수정모형을 적용하여. 자원・환경경제연구. 11(1): 81-98.

구자용, 유명진, 김신걸, 심미희, 소천명. 2005. 주성분분석과 군집분석을 이용한 장기 물 수요 예측과 활용. 대한환경공학회지. 27(8): 870-876.

김광임. 1996. 상수도 수요예측을 반영한 공급정책 방향 연구: 상수도 수요 모형 개발. 한국환경기술개발원.

김종원, 한동근. 2007. 스톤-게리 모형을 이용한 생활용수에 대한 수요추정. 자원・환경경제연구. 16(4): 781-802.

김연주, 정은성. 2011. 수자원 현황 및 영향요인: 기후변화를 중심으로. 한국환경정책평가연구원.

김하나. 2016. 지속가능한 물과 에너지 관리. 환경법과 정책. 16: 101-131.

김홍배, 김재구. 2010. 우리나라의 지역별 용수 수요 예측에 관한 연구. 지역연구. 26(1): 85-101.

류문현, 장석원. 2012. 광역 상수도 수요탄력성 추정 연구. 대한상하수도학회・한국물환경학회 공동춘계 학술발표논문집. 254-255.

류문현, 장석원. 2017. 물-식량-에너지 넥서스 기반 기축을 위한 사회경제적 정책 의제. 물 정책・경제. 28: 71-85.

류재나. 2015. 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물 수급관리 정책 지원을 위한 기초연구. 한국환경정책평가연구원.

명성민, 이두진, 김화수, 조진남. 2011. 가정용수의 수요량 예측을 위한 통계적 모형 비교. 응용통계연구. 24(4): 567-573.

국토교통부. 2017. 물과 미래

민동기. 2005. 공업용수 수요량 추정과 가격현실화 정책 효과분석. 자원・환경경제연구. 14(2): 475-491.

박두호, 최한주. 2006. 패널 자료를 이용한 생활용수의 수요탄력도 분석 및 가격정책. 상하수도학회지. 20(4): 527-534.

박현주, 김충일, 한무영. 2014. 물 재이용 활성화를 위한 결정요인분석. 대한환경공학회지. 36(4): 271-276.

서재승, 이동률, 최시중, 강성규. 2011. 수요관리에 의한 물

www.kci.go.kr

수급변화 분석. 대한환경공학회지. 33(11): 797-803.
서현철, 홍원화, 남경목. 2012. 거주자 구성유형 및 소득수준에 따른 주거용 건물 내 전력 소비성향. 한국주거학회논문집. 23(6): 31-38.
이상현, 최진용. 2015.지속가능개발 (Sustainable Development)과 식량 확보 관점의 물-에너지-식량 넥서스의 개발 및 연구 동향. 물과 미래: 한국수자원학회지. 48(11): 32-41.
정우진. 2015. 에너지・식량・물 불안 가속화: 시장기능 확대와 기술개발로 대응. FUTURE HORIZON. (23): 16-19.
이상신. 2012. 기후변화에 따른 수자원 분야 영향. 한국기후변화연구원.

Received: Jan. 31, 2018 / Revised: Apr. 2, 2018 / Accepted: Apr. 18, 2018

www.kci.go.kr

국내 물 수요에 대한 에너지 및 식량 공급의 영향력 검증

– 패널자료 모형을 이용한 탄력성 추정 –

국문초록 본 연구는 물 부족 위기관리를 위한 WEF Nexus(물-에너지-식량 연계성) 관련 기초자료의 확보를 위해, 기후인자와 사회・경제요인이 투입된 물 수요모형을 구축하고 국내 용수 이용량에 대한 에너지 및 식량 공급의 영향력을 실증 분석하였다. 1998년부터 2014년까지 17년간의 정량 분석 자료를 바탕으로, 전국 16개 시도별 용수 이용량과 물 연계요인(에너지소비량, 식량작물생산량), 기후요인(강수량, 기온), 경제요인(지역내총생산, 수도요금) 관련 자료를 활용하였으며, 지역 간 이질성이 반영된 가능일반화최소자승(feasible generalized least squares) 패널 모형을 통해 용수 이용량의 결정요인과 탄력성을 산출하였다. 주요 결과는 다음과 같다. 에너지 소비량, 식량작물생산량, 지역내총생산, 수도요금 모두 유의한 영향력을 나타냈으나, 강수량과 기온의 효과는 비유의한 것으로 확인되었다. 물 이용량에 대한 탄력성은 에너지소비량=0.084, 식량작물생산량=0.412, GDRP=0.318, 수도요금=-0.199로 나타났다.

주제어 : 기후변화, 물–에너지–식량 연계성, 수자원 수요, 패널자료 모형

Profiles **Hee Kyun Oh :** He received his bachelor's and a master's degrees from Griffith University, and a doctor's degree from Sejong University. He is a visiting professor of the Department of Hospitality Tourism Management at Sejong University. His research interests included tourism economics and hospitality marketing(ohheekyun@sejong.ac.kr).

Hee Chan Lee : He received his bachelor's and a master's degrees from Korea University, and a doctor's degree from Michigan State University. He is a professor of the Department of Hospitality Tourism Management at Sejong University. His research interests included tourism economics and tourism policy(leeheech@sejong.ac.kr).

www.kci.go.kr