지역개발연구 제51권 제2호, 2019년 12월, pp.81-107
The Studies in Regional Development, Vol.51, No.2, 2019
http://dx.doi.org/10.35526/srd.2019.51.2.005

기후변화에 대응한 효율적 수자원 관리*

- 수질오염 개선사업의 경제적 파급효과 분석 -

박창근** · 조동인*** · 최가영**** · 송재령***** · 이종욱****** · 박지영*******

본 연구는 지구온난화로 기후 불확실성이 증가함에 따라 효율적인 수자원 관리를 위한 경제적 손실산정 접근법을 활용하여 미래 수자원 관리에 대한 새로운 기준을 제시하였다. 특히 기후변화로 인한 영향이 지역 또는 계층 간에 차이가 날 수 있으며, 기후변화 영향이 사회 및 자연생태계 시스템에 미치는 파급력은 점증하는 경향이 있기에 지역별로 받는 영향을 보다 세분화하는 작업을 통해 수자원 대책에 대한 비용분담과 이에 대한 효과를 고려한 수자원 관리 전략을 살펴보았다. 이를 위해 본 연구는 수질오염 관리 대책의 최신 연구 동향을 개관하고 미래 기후변화로 인해 발생 가능한 수질오염이 초래하는 경제적 파급효과를 새로운 거시경제모형기법을 활용하여 분석하였다. 기후변화로 인한 기온상승과 강우유형 변화로 발생할 것으로 예상하는 수질오염을 개선하기 위해 투입되어야 할 산업별 수질 개선비용을 기후 시나리오별(RCP 4.5, 8.5)로 추정하고 미래시점인 2030년과 2050년의 지역간 경제모형구축을 통해 파급효과 분석을 실시하여 향후 수질오염 개선비용을 지역이나 산업별로 산정할 때 유효한 기준이 되도록 제시하였다. 본 연구에서 적용한 탄력적 산업연관 방법론으로 미래시점 산업구조 변화를 예측하고 이를 반영한 모형으로 수질 관리 대책을 평가하면 장기적으로 나타날 기후변화 영향의 잠재적 편익과 비용을 현재 시점에서 조망할 수 있게 되어 현실적인 수자원 관리 대책을 지역별로 수립하고 시행하는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

주제어 : 기후변화, 수질오염, 물관리, 탄력적산업연관모형, 미래경제모형

* 본 연구는 환경부 "기후변화대응 환경기술개발사업(2014001310006)"의 지원과 2019년 녹색기술센터 '해외선진기관과의 기후기술협력 체계구축 기획연구'를 통해 수행되었습니다.

** 서울대학교, Tel: +82-02-880-4745 E-mail: beinji2@snu.ac.kr
*** 뮤레파코리아, Tel: +82-070-8064-1575 E-mail: didi9535@murepa.com
**** 녹색기술센터, Tel: +82-02-3393-4012 E-mail: choigayoung@gtck.re.kr
***** 녹색기술센터, Tel: +82-02-3393-3926 E-mail: makingbetterworld@gtck.re.kr
****** 뉴욕주립버팔로대학교, Tel: +1-716-817-4652 E-mail: jongooklee@gmail.com
******* 교신저자, 뉴욕주립버팔로대학교/서울대학교, Tel: +1-716-829-5331/+82-02-880-4745
E-mail: jp292@buffalo.edu/jiyoungp@snu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

기후변화는 대한민국과 국제사회에서 가장 핵심적인 의제 중 하나로 논의되고 있다. 이미 기후변화로 인한 환경 생태학적 변화를 경험하고 있으며, 이의 영향이나 피해 역시 전 지구적 규모로 나타나고 있다. 이에 따라 파리협정은 전 지구적 적응 목표로 각 국가가 기후변화에 대해 기후 회복력 강화 및 적응 역량을 증진하고 취약성을 줄이는 것을 목표로 설정하였다. 우리나라도 '기후변화 적응으로 국민이 행복하고 안전한 사회 구축'이라는 비전을 제시하고 적응정책의 기본방향을 담은 제1차·2차 국가 기후변화 적응대책을 수립하였다. 또한 『저탄소녹색성장기본법』 제40조를 수립근거로 하여 기후변화 대응 기본계획을 수립하여 시행하고 있다.

지구온난화에 따른 전 지구적인 기후변화로 물 순환 역시 큰 영향을 받고 있다. IPCC 특별 보고서(IPCC, 2018)에 따르면 전 세계적으로 지구온난화에 의한 강수의 강도와 변동성이 증가하여 홍수와 가뭄에 의한 피해가 점증할 것으로 예측했다. 이처럼 국제사회에서 기후변화와 물의 상관관계가 중요한 문제로 논의되고 있으며, 일부 선진국은 기후변화에 따른 물 관리의 중요성을 심각하게 인식하여 각종 대책을 수립하고 있다. 기후변화로 인한 물 관리 체계는 공급뿐만이 아니라 수요측면의 대책도 함께 고려할 필요가 있다. 수요측면에서 물 관리 대책을 수립하는데 활용할 수 있는 방법론으로 가상물 흐름(virtual water flows)을 분석하여 산업별 혹은 지역별 물 이용 실태를 분석하는 방법이 있다. 가상물 흐름은 제품 생산과정에서 사용하는 물을 추적하는 방식으로 주로 산업연관모형을 산업별 물이용 행렬과 결합하여 지역이나 국제적인 교역에 연계된 물 이용 현황을 분석하는데 적용된다(White et al., 2015; Hoekstra and Mekonnen, 2012; Duarte et al., 2015). 이를 통해 각 부문이 효율적인 물이용 방안을 세울 수 있을 뿐만 아니라 기후변화에 능동적으로 대처하는 물관리 정책을 수립하여 실행하는데 근거를 제시할 수 있다.

기후변화로 인해 지속 가능한 물 관리가 필요하다는 인식이 널리 퍼지고 있으나, 기존의 물 관리 체계로는 강수 관련 불확실성이 증가하는 상황에 대비한 재난 방지책을 다른 사회 시스템과 연계하여 수립하기에 한계가 있다(김연수 외, 2016). 국내에서는 물 공급과 수질 관리 측면에서 대책이 논의되고 있고 이러한 대책에 경제성 측면을 고려한 분석이 포함될 때 사회, 경제, 환경 요소가 반영된 효율적인 대책 수립이 이루어질 수 있다. 최근에는 물 관리를 위한 수자

원 정보의 효율적 관리 및 이용을 위해 빅데이터와 머신러닝 등의 복합적인 과학기법을 바탕으로 하는 수질오염 관리방법이 새로운 대안으로 제시되고 있다. 수자원 관리에서 체계적이고 과학적인 방식의 도입은 운영이나 관리를 위한 의사결정에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다(서울연구원, 2016; Abbaspour, 2011; 장석화 외, 2018).

기후변화와 수자원 관련 연구에서 경제성을 분석한 기존 연구는 단편적인 부분에서 경제적 가치를 평가하거나 단기적인 관점을 유지하는 한계점이 있다 (2장 선행연구 참조). 수자원 관리나 수질오염 관리에서 발생하는 편익이나 비용을 평가하고 있지만, 기후변화로 인한 수질오염 관리 대책을 전반적인 산업활동과 연계하여 경제성을 평가한 연구는 찾아보기 힘들며, 특히 미래시점에서 예상되는 경제적 가치를 예측하는 연구는 더욱 찾아보기 어려운 상황이다. 수질오염 관리 대책으로 본 연구는 미래 기후변화로 인해 발생 가능한 수질오염이 초래하는 경제적 파급효과 분석에 초점을 맞추어 기초적인 데이터 작업과 함께 미래 경제적 분석을 위한 방법론을 적용했다. 기후변화로 인한 기온상승과 강우유형 변화로 발생할 것으로 예상하는 수질오염을 개선하기 위해 투입되어야 할 산업별, 지역별 수질 개선비용을 기후변화 시나리오별(RCP 4.5, 8.5)로 추정하였으며, 이를 미래시점(2030년, 2050년) 지역산업연관모형에 적용하여 수질 개선비용의 경제적 파급효과를 지역별, 산업별로 예측했다. 미래시점(2030년, 2050년) 지역산업연관모형을 구축하기 위해 탄력적 산업연관(Flex-IO) 방법론(Park and Richardson, 2015; Park et al., 2017)을 적용하여 한국은행의 2013년 지역산업연관표를 목표 시점(2030년, 2050년) 지역산업연관표로 갱신하였다.

기후변화의 영향은 장기간에 걸쳐 나타나 불확실성이 크기 때문에 구체적인 대책으로 현재 및 미래의 기후변화 취약성을 줄이기 위해서는 본 연구와 같이 미래시점의 경제성평가를 통해 기후변화로 예상되는 편익과 손실을 예측하는 작업이 필수적이다. 전 세계적으로 기후변화 현상이 나타나고 있지만, 지역별로 그러한 영향을 받는 정도나 국가별로 기후변화에 대처하는 능력에서 차이가 존재할 뿐만 아니라, 분야별로 기후변화에 의한 위험과 기회가 상이하게 나타나므로 기후변화와 관련된 다양한 주제에 대해 그 효과의 차이를 부문별 혹은 지역별로 비교하여야 한다. 이를 통해 국가 차원에서 효율적이고 효과적인 기후변화 대책을 시행할 수 있으며, 각 지자체도 여러 기후변화 대책에서 우선순위를 두고 지역 상황을 반영한 효과적인 대책을 추진할 수 있게 된다.

이처럼 기후변화의 특성을 충분히 고려한 효과적인 대책을 추진하기 위해서

는 그 효과를 부분별, 지역별로 분석할 수 있어야 하고, 동시에 미래시점의 효과도 고려해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 본 연구는 지역산업연관모형을 적용해 수질오염 관리 대책의 경제적 파급효과를 지역별로 분석하였고 미래시점의 효과를 예측하기 위해 탄력적 산업연관 방법론을 활용해 미래시점의 지역산업연관모형을 적용하였다. 본 연구의 장점은 다음과 같다. 첫째, 탄력적 산업연관 방법론으로 미래시점 산업구조 변화를 예측하고 이를 반영한 모형으로 기후변화 대책을 평가하는 과정을 거치면 장기적으로 나타날 기후변화 영향의 잠재적 편익과 손실을 현재 시점에서 조망할 수 있다는 점이다. 두 번째로 본 연구의 결과를 통해 기후변화 정책 담당자는 현실적인 기후변화 대책을 지역별로 수립하고 시행하는 데 도움을 얻을 수 있다. 마지막 장점으로 본 연구는 각 지자체가 기후변화 대책 시행으로 인한 성과측정이나 적응대책 효과를 예측하는 데 정량적 근거를 제공한다는 점이다.

Ⅱ. 기후변화와 수자원 관리 선행연구

기후변화와 관련한 수자원 관리 선행연구는 크게 질환과 관련된 부분, 적응전략과 적응정책의 수립을 위한 지표개발과 일차적 비용 분석, 가뭄과 관련한 수질오염 이슈들이 그 주를 이룬다. 특히 최근 해외에서 수행되었던 수자원 관리 연구들은 수질오염에 따른 수생태계 이슈나 지속가능한 환경적 측면에서 사회와 경제에 미치는 영향을 파악하는 것으로 연구 초점이 변하고 있다. 다만 이러한 선행연구들이 산업 전반에 걸친 영향 관계를 파악하거나 미래변화를 반영하는 경제구조를 고려하는 부분은 아직 충분하지 않은 것으로 파악된다. 본 연구는 물 관리를 미래 경제적 파급효과와 연계하여 분석하였다는 측면에서 국제적 연구 추세에 부합할 뿐만 아니라, 단편적인 연구 결과를 제시하는 것에서 벗어나 종합적인 미래분석을 시도하였다는 측면이 선행연구와 차별화되는 부분이다.

기후변화에 의한 기온 및 수온 상승은 수자원의 양적 변화와 극한기후에 의한 수재해 유발, 수질 변화에도 영향을 주어 수인성 질환과 같은 질병 매개의 전체적인 양상을 변화시켜 일반 대중의 건강에 직간접적인 위협 요소가 될 수 있다(Costello et al., 2009). 기후변화로 수온과 부유 영양물질이 증가하여 유해성 남조류 세균이 기존 예상치 이상으로 번식하게 되면 식수 관리와 어업에 부정적 영향을 미칠 수 있으며(Paerl and Paul, 2012), 담수 생태계뿐만 아니라 연근해

수중 생태계도 이와 같은 기후변화의 영향을 받을 수 있다(Evans et al., 2005).

기후변화는 물이용 측면에도 영향을 미치며, 지속가능한 물이용을 위해서는 높은 상하수도 보급률 달성, 양질의 수자원 확보, 안정적 재정투자, 친환경적 토지관리, 수질 개선과 같은 다양한 정책 수립과 이행이 필요하다. 김연주 외(2014)와 김익재 외(2015)는 기후변화 심화로 위협받는 지속가능 물이용 정책을 수립하기 위해 통합적이고 포괄적인 물이용 및 평가 체계 구축에 필요한 지표 개발과 적용방안을 강조했다. 국내 기후변화 적응대책의 물관리 분야는 주로 홍수 및 가뭄, 물환경 관리에 중점을 두는 상황에서 안종호 외(2012)는 기후변화로 인한 상하수도 시스템의 영향평가를 통해 부문별, 지역별 취약점을 파악하여 적응전략을 제시하고 기후변화 적응비용을 추정하는 연구를 수행했다.

수질오염과 관련해서는 이서로 외(2019)는 기후변화의 영향으로 극심한 가뭄이 왔을 때, 남한강 본류의 갈수기 수질 변화를 예측하고 섬강 유역 내 갈수기 유량 확보 시나리오에 따른 섬강 말단 및 남한강 본류의 갈수기 수질 개선 효과를 분석하였다. 이를 통해 기후변화로 인한 섬강 및 남한강 본류의 갈수기 수질을 효율적이고 합리적으로 관리할 수 있는 대책 수립에 활용할 근거를 제시하였다. 국내에서는 주요 수계에 수질오염물질 총량관리제도가 실시되고 있으며, 한택환과 이효창(2014)은 수질오염물질에 대한 가상적 배출권거래시장을 상정하여 균형배출권 가격을 도출하여 수질개선의 편익을 추정하였다. 이창희와 박경옥(2017)은 오염부하량을 활용하는 방법을 제안하여 생태계 서비스 중에서 수질조절 서비스를 정량적으로 산출하고 이를 경제적 가치로 평가했다. 유역에 배출된 오염부하량과 유역 출구에서 측정한 부하량을 비교하여 수질조절 서비스를 정량화하고 여기에 환경기초시설의 처리단가를 적용하여 생태계 수질조절 서비스의 경제적 가치를 산정했다.

기후변화와 관련된 수자원 관리에서 해외의 최근 연구사례를 살펴보면, 먼저 Karaouzas et al.(2018)은 기후변화로 인한 물 스트레스(물 유출량으로 측정)와 오염물질과 같은 인위적 요인이 하천 생태계에 미치는 영향을 평가하여 수자원 관리에 적용할 수 있게 했다. 시뮬레이션 모형을 적용해 오염물질이 하천 생태계에 미치는 영향을 다양한 기후변화 시나리오를 적용해 분석한 연구도 있다(Yang and wang, 2010; Zeng et al., 2020; Chiu et al., 2017). 수자원 관리의 가치평가에서 Wei et al.(2017)은 장기간에 걸친 호주 수자원의 사회적 가치변화를 경제개발과 지속가능한 환경 측면에서 평가했으며, Ahlivik and Hyytiäinen (2015)는 발트 해의 수질오염 관리에 필요한 비용의 경제적 가치를 기후변화의

불확실성을 고려하여 평가했다. 수질오염 악화가 주택가격에 미치는 부정적 영향을 공간 헤도닉 모형을 적용하여 분석하거나, 수질오염 환경 보조금 기준으로 수질오염을 관리의 경제적 가치를 평가하기도 했다(Cho et al., 2011; Wu et al., 2018).

Ⅲ. 탄력적 산업연관 방법론

기존의 산업연관분석이 가진 고정계수의 한계를 개선하기 위해 베이지안 기반의 유사 동태모형인 탄력적 산업연관모형(Flex-IO)을 Gordon et al.(2009)과 Park and Richardson(2015)이 구축하고 탄력적 산업연관 방법론을 제안했다. Gordon et al. (2009)은 전통적인 산업연관분석이 고정된 계수를 활용하므로 미래의 새로운 효과 등을 반영할 수 없는 약점을 보완하기 위해 새로운 방법론을 소개했다. 2개 산업으로 구성된 간단한 모형을 통해 고정된 계수가 갱신될 수 있도록 새로운 투입-산출 계수를 구축하는 방법을 제시했는데 해당 연구는 민간부문의 수요가 경제구조 변화에 미치는 영향을 산업연관 방법론에 적용하여 처음으로 증명하였다.

탄력적 산업연관 방법론은 수요와 공급 측면을 동시에 활용하여 산업연관계수의 고정성을 동태적으로 변화하게 만들어 주는 방법이며, 분석하고자 하는 시기로 산업연관표를 갱신하여 투자나 경제구조 변화에 의한 산업연관 관계의 변화를 분석할 수 있게 해준다. 특히 가격변동이 불안정하거나 가격변동에 따른 경제구조 변화를 반영하기 어려운 일반균형모형(Computable General Equilibrium; CGE)의 단점을 극복하면서 수요와 공급을 모두 고려한다는 측면에서 산업연관계수 추정을 위한 일반균형적 접근이라고 할 수 있다.

기본적인 수요중심과 공급중심의 산업연관모형은 다음의 수식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

$$X^I = (I - A_0)^{-1} F \tag{1}$$

여기서, X^I는 산업부문별 총투입 행벡터,

F 는 정부지출, 수출 등을 포함한 최종수요,

$(I-A)^{-1}$는 Leontief 역행렬을 의미함.

$$X^O = W(I - B_0)^{-1} \tag{2}$$

여기서, X^O는 산업부문별 총산출 열벡터,
W 는 임금, 세금 등을 포함한 부가가치,
$(I-B)^{-1}$는 Ghoshian 역행렬을 의미함.

탄력적 산업연관모형의 외생 변인은 특정 시점의 최종수요 변화와 부가가치 변화이다. 탄력적 산업연관 분석은 총 투입 행벡터와 총 산출 열벡터를 각각 수요 중심과 공급 중심의 산업연관계수에 적용하여 실시한다. 목표 시점의 수요 중심과 공급 중심 산업연관계수 *A(t)*, *B(t)*는 다음과 같이 갱신과정을 통해 도출할 수 있다.

$$A(t) = \Gamma_t [Z^s(t)] \tag{3}$$

여기서, $Z^s(t)$는 $X^s(t)$에 기반한 기준 산업연관 계수표이며,
$X^s(t)$는 총투입 행벡터임.

$$B(t) = \Theta_t [Z^d(t)] \tag{4}$$

여기서, $Z^d(t)$는 $X^d(t)$에 기반한 기준 산업연관 계수표이며,
$X^d(t)$는 총산출 열벡터임.

Γ_t와 Θ_t는 기준 년도 지역산업연관 계수표를 갱신하는 행렬함수이다. 각각 산업별 두 시점 간 민간최종지출(최종수요) 비율과 지역내총생산(GRDP) 비율을 나타낸다. 예를 들면, 각 산업의 목표 시점(t=1) 민간최종지출(혹은 국내총생산)을 기준시점(t=0) 민간최종지출(혹은 국내총생산)로 나눈 비율이 행렬함수 Γ_t와 Θ_t를 구성한다. 기존의 RAS 방법론이 최종수요와 총생산의 실제값을 적용하여 행렬의 수렴을 찾는 것과 달리 탄력적 산업연관 방법론은 두 시점 간 실제값의 비율을 적용하여 RAS 방법보다 효과적으로 행렬을 갱신하는 장점이 있다. 따라서 갱신된 수요기반과 공급기반 지역산업연관계수는 목표 시점의 지역별 산업구조 변화를 모두 반영한 결과물이 된다.

Ⅳ. 분석 대상 자료의 구축

본 연구는 분석 대상으로 기후 시나리오별 전국 각 하천 유역의 단위당 총 인(TP)의 양 변화를 수질오염 개선사업의 주요 관리대상으로 선정했다. 기후 시나리오별 전국 하천 유역에 포함된 총 인의 양을 목표 수질 기준으로 맞추기 위해 줄여야 하는 총 인의 양을 미래시점별로 도출한 후 단위당 생물학적 산소요구도 가치(1,409원/kg)를 적용하여 수질오염 개선 비용을 계산했다. 이렇게 도출한 수질오염 개선 비용을 지역별, 산업별로 배분하여 파급효과 분석을 위한 투입자료로 활용했다. 수질 개선사업의 파급효과 분석에 투입자료로 적용할 기후 시나리오 및 미래시점별 개선 비용을 다음의 <표 1>에 나타냈다.

본 연구에서 활용한 기후변화 시나리오인 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오는 온실가스 배출량을 기준으로 했다. RCP 시나리오에서 사용하는 대표 온실가스 농도는 2.6, 4.5, 6.0, 8.5의 네 가지로 RCP 2.6은 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로 회복 가능한 경우를 의미한다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당 수준 실현된 경우이고 RCP 6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현된 상태를 나타내며, 마지막으로 RCP 8.5는 온실가스 저감 없이 현재 추세가 지속하는 상태를 가정한다. 본 연구에서는 RCP 4.5와 RCP 8.5를 수질오염에 대한 절대 크기를 활용하였다.

〈표 1〉 기후 시나리오별 수질오염 개선 비용(백만원)

기후시나리오		RCP 4.5		RCP 8.5	
산업색인 ＼ 목표 시점		2030	2050	2030	2050
01	농림수산품	0	0	0	0
02	광산품	863	1,152	393	1,289
03	음식료품	39,075	52,153	17,769	58,336
04	섬유 및 가죽제품	15,758	21,032	7,166	23,526
05	목재 및 종이, 인쇄	17,517	23,380	7,966	26,152
06	석탄 및 석유제품	13,193	17,608	5,999	19,696
07	화학제품	22,768	30,388	10,353	33,991
08	비금속 광물제품	3,629	4,843	1,650	5,417
09	1차 금속제품	29,889	39,893	13,592	44,622
10	금속제품	6,559	8,755	2,983	9,793
11	기계 및 장비	19,850	26,494	9,027	29,635

기후시나리오		RCP 4.5		RCP 8.5	
산업색인 \ 목표 시점		2030	2050	2030	2050
12	전기 및 전자기기	295	394	134	441
13	정밀기기	0	0	0	0
14	운송장비	0	0	0	0
15	기타 제조업 제품 및 임가공	318	424	144	474
16	전력, 가스 및 증기	2,140	2,857	973	3,196
17	전력, 폐기물 및 재활용서비스	7,981	10,652	3,629	11,914
18	건설	0	0	0	0
19	도소매서비스	479	639	218	715
20	운송서비스	0	0	0	0
21	음식점 및 숙박서비스	0	0	0	0
22	정보통신 및 방송서비스	0	0	0	0
23	금융 및 보험서비스	0	0	0	0
24	부동산 및 임대	0	0	0	0
25	전문, 과학 및 기술 서비스	0	0	0	0
26	사업지원서비스	23,837	31,815	10,840	35,587
27	공공행정 및 국방	0	0	0	0
28	교육서비스	0	0	0	0
29	보건 및 사회복지서비스	1,014	1,354	461	1,514
30	문화 및 기타서비스	20,814	27,780	9,465	31,074

주석: 한국환경정책평가연구원의「부문별 기후변화 영향 및 취약성통합평가 모형 기반구축 및 활용기술 개발」6차년도 내부보고서(2019)를 활용하여 비용을 계산했음

수질오염 개선 비용은 음식료품이 전체의 17.3%를 차지해 가장 높은 비용을 부담해야 하는 산업으로 분석되었으며, 1차 금속제품(13.2%), 사업지원 서비스(10.5%), 화학제품(10.1%)의 순으로 수질 개선을 위해 큰 비용을 부담해야 하는 산업으로 나타났다.

Ⅴ. 분석 결과

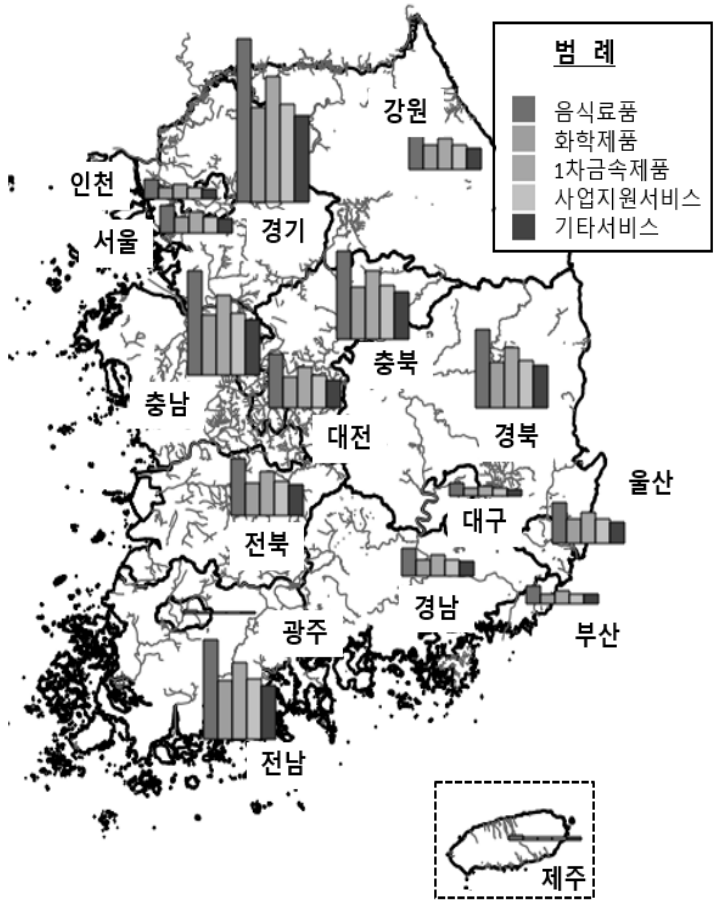
탄력적 산업연관 방법론을 적용하여 한국은행의 2013년 지역산업연관표를 2030년과 2050년 지역산업연관표로 갱신하려면 해당 시점까지 수요와 공급 측

면의 예측자료가 필요하다. 수요측면은 민간최종지출 자료를 목표 시점까지 추정하기 어려워 현재의 지출조건과 동일하다고 가정하고 비율을 적용할 때 1이라고 표시했다. 공급 측면의 경우는 지역내총생산(GRDP) 자료를 활용하였으며, 2010년부터 2016년까지의 통계청 자료를 기초로 3년 평균치 방법을 적용하여 목표 시점까지의 예측치를 추정하여 분석에 활용했다.

<표 1>의 기후 시나리오별 수질오염 개선 비용을 2030년과 2050년의 지역사업연관표에 적용하여 분석한 수질 개선사업의 경제적 파급효과 결과를 <표 2>와 <그림 1>에 표시하였다. 기후 시나리오 RCP 4.5를 대상으로 2030년 총 파급효과 결과를 상위 5개 산업을 중심으로 나타내었다. 그 외 RCP 8.5 기준 2030년 결과와 2050년 결과는 부록의 표로 첨부하였다.

〈표 2〉 2030년 수질오염 개선사업의 총 파급효과(RCP 4.5, 백만원)

지역 \ 산업색인	3	9	26	7	30	총합
서울	963	744	581	566	516	5,924
부산	886	684	535	521	475	5,451
대구	655	506	396	385	351	4,033
인천	1,318	1,018	796	775	707	8,112
광주	169	130	102	99	90	1,038
대전	2,553	1,972	1,542	1,501	1,368	15,709
울산	1,975	1,525	1,192	1,161	1,058	12,151
경기	7,656	5,914	4,623	4,503	4,103	47,110
강원	1,960	1,514	1,184	1,153	1,050	12,060
충북	4,192	3,238	2,532	2,466	2,247	25,796
충남	4,924	3,804	2,973	2,896	2,639	30,298
전북	2,732	2,111	1,650	1,607	1,464	16,814
전남	4,741	3,662	2,863	2,788	2,541	29,172
경북	3,718	2,873	2,246	2,187	1,993	22,882
경남	1,311	1,012	791	771	702	8,065
제주	291	225	176	171	156	1,790
전국	40,042	30,934	24,182	23,551	21,461	246,407
비율	16.3%	12.6%	9.8%	9.6%	8.7%	



〈그림 1〉 2030년 수질오염 개선사업 파급효과 산업 색인별 광역지자체 분포(RCP 4.5,)

<표 2>의 분석 결과를 보면 전국 기준 수질 개선사업에서 예상되는 총비용은 대략 2,460억 원에 달하는 것으로 예측되었다. 산업별 총비용을 분석하였을 경우, 음식료품이 전체의 16%(약 400억 원)로 가장 비용이 큰 산업으로 나타났다. 다음으로 1차 금속제품, 사업지원 서비스업, 화학제품 제조업, 문화 및 기타서비스업에서 각각 12.6%(310억 원), 9.8%(242억 원), 9.6%(236억 원), 8.7%(215억 원)의 총비용이 발생할 것으로 분석되었다. 또한, 직접 수질오염 개선 비용을 제외한 산업연계에 의한 간접비용을 분석하였을 때, 전국 기준으로 금융 및 보험 서비스가 전체의 14%로 가장 높았으며, 전 산업에 걸쳐 간접비용이 고르게 분포하는 것으로 나타났다.

지역별로 수질오염 개선 비용을 분석한 결과, 경기도가 전체의 19.1%(약 471억

원)를 부담해야 하고 그 뒤를 이어 충청남도(303억 원, 12.3%)와 전라남도(292억 원, 11.8%)가 높은 비용을 부담해야 할 것으로 분석되었다.[1] 인천, 대전, 경기, 충청남도, 충청북도, 전라북도, 경상북도, 경상남도에서 음식료품 제조업이 지역별 개선 비용에서 차지하는 비중이 다른 산업에 비해 상대적으로 높은 것을 확인 할 수 있었다.

지역별 결과를 4대강 유역과 비교해 보면 (그림 1 참조), 금강 유역에 해당하는 대전, 충청남도, 전라북도의 수질오염 개선 비용부담이 전체의 25.5%로 가장 높았고 한강(서울, 인천, 경기도), 낙동강(부산, 대구, 경상남도, 경상북도) 유역의 부담비용이 각각 24.8%와 16.4%로 그 뒤를 잇는 것으로 나타났다. 마지막으로 영산강 유역에 포함되는 광주, 전라남도의 비용은 전체의 12.3%로 다른 강 유역과 비교하면 상대적으로 개선 비용 부담이 낮은 것으로 분석되었다.

이와 같은 결과를 통해 기후변화로 인한 수질오염 개선 비용을 지역이나 산업별로 산정할 때 본 연구의 결과가 개선 비용의 분배를 위한 중요한 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 하천 유역의 오염 원인을 규명하는 과정이 어려운 상황에서 본 연구와 같이 발생량 비율을 활용한 경제적 가치전환 결과가 유효한 기준이 될 수 있다. 4대강 유역에 해당하는 지자체들은 깨끗한 생활 및 농공업 용수를 장기간 안정적으로 확보하기 위해서 상호 협력 체계를 구축해야 하며, 본 연구 결과를 활용하면 서로 책임 분담이나 협력 체계를 조직하는데 기초자료로 활용할 수 있을 것으로도 기대하는 바이다.

Ⅵ. 결론 및 제안

지구온난화로 기후 불확실성은 증가하고 있으며, 이에 따라 보다 효율적인 자원관리를 위한 새로운 기술의 도입이 더욱 절실하게 요구된다. 특히 물 관리에 있어 물 관련 재난 발생의 대형화, 복합화, 비정형성과 같은 양상을 고려하면 예방 및 신속한 대응을 위한 기술 도입이 필수적이다(K-water 융합연구원, 2017).

기후변화로 인한 영향은 지역 또는 계층 간 차이가 날 수 있으며, 기후변화 영향이 사회 및 자연생태계 시스템에 미치는 파급력은 점증하는 경향이 있다.

1) RCP시나리오나 2050년 결과의 경우, 투입 규모에서 절대값의 차이 이외에는 상대적 비율이 동일하므로 이에 따른 총 피해 규모의 차이 역시 시나리오나 연도에 따라 같은 비율로 나타나 이를 부록에 제시하여 규모를 파악하는 정도로 제시하고 추가적 설명은 생략하였다.

전 세계적으로 기후변화 현상이 나타나고 있지만, 지역별로 그러한 영향을 받는 정도나 국가별로 기후변화에 대처하는 능력에서 차이가 존재할 뿐만 아니라 분야별로 기후변화에 의한 위험이 다르므로 기후변화와 관련된 다양한 주제에 대해 엄밀한 분석을 통해 그 효과를 규명할 필요가 있다.

물 관리를 위한 수자원 정보의 효율적 관리와 이용을 위해 빅데이터와 머신러닝 등의 복합적인 과학기법을 활용한 수질오염 관리방법이 최근 새로운 대안으로 등장하고 있다. 수질오염 관리 대책으로 본 연구는 최근의 연구 동향을 개관하였고 미래 기후변화로 인해 발생 가능한 수질오염이 초래하는 경제적 파급효과를 분석했다. 기후변화로 인한 기온상승과 강우유형 변화로 발생할 것으로 예상하는 수질오염을 개선하기 위해 투입되어야 할 산업별 수질 개선 비용을 기후 시나리오별(RCP 4.5, 8.5)로 추정하여 경제적 파급효과를 분석하는데 적용하였다. 미래시점(2030년, 2050년)의 파급효과 분석을 위해 해당 시점의 지역산업연관표를 탄력적 산업연관 방법론으로 구축했다.

수질오염 개선사업의 총 효과를 분석한 결과, 음식료품(16%, 400억 원)이 가장 비용이 큰 산업이며, 다음으로 1차 금속제품, 사업지원 서비스업, 화학제품 제조업, 문화 및 기타서비스업에서 각각 12.6%(310억 원), 9.8%(242억 원), 9.6%(236억 원), 8.7%(215억 원)의 총비용이 발생할 것으로 분석되었다. 지역별 수질오염 개선 비용부담을 살펴보면 경기도가 전체의 19.1%(약 471억 원) 정도를 부담해야 하며, 충청남도(303억 원, 12.3%)와 전라남도(292억 원, 11.8%)의 순으로 비용부담이 클 것으로 분석되었다. 하천 유역의 오염 원인을 규명하는 과정이 어려운 상황에서는, 본 연구와 같이 발생량 비율을 활용한 경제적 가치전환 결과는 수질오염 개선 비용을 지역이나 산업별로 산정할 때 유효한 기준이 되리라 판단된다. 4대강 유역에 있는 지자체들은 본 연구의 지역별 결과를 활용하면 안정적인 수자원 관리에 필요한 비용과 국가적 지원에 대해 상호 협력 체계를 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서 적용한 탄력적 산업연관 방법론은 한국에서 처음으로 적용되어 미래시점 산업구조 변화를 예측하였다는 점에서 방법론적 수월성과 함께, 이를 반영한 모형으로 수질 관리 대책을 평가하였기에 장기적으로 나타날 기후변화 영향의 잠재적 편익을 현재 시점에서 조망할 수 있게 되어 현실적인 수자원 관리 대책을 수립하고 시행하는 데 도움이 될 것으로 기대한다. 다만 기후변화의 영향이 장기적으로 나타남에도 불구하고 본 연구가 이러한 미래시점의 기후변화 영향을 2030년과 2050년만을 목표로 설정하여 수행한 것은 한계점이라고 할

수 있다. 이는 현재 환경부에서 제시하고 있는 연구수행 상의 미래시점이 2030년과 2050년을 기준으로 하고 있다는 측면에서 이해될 수 있으나, 보다 장기적 관점에서 그 효과를 측정하기 위해서는 연구 시점을 5년 혹은 10년 단위로 추가하는 연구작업이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 수요와 공급 측면의 예측 자료를 추정할 때 적용할 수 있는 자료의 한계로 인해 수요의 경우 기준시점과 목표시점의 지출비율이 동일함을 가정하였다거나, 공급측면에 있어서 단순 추세를 적용하여 미래 GRDP 예측자료를 도출한 점도 연구수행에 있어 한계점이라고 할 수 있다. 다만 이러한 부분은 현재 인구추정 등을 반영한 현실적인 예측모형을 적용한 연구를 통해 보완 가능하며, 후속 연구를 진행하여 이러한 문제점을 보완할 필요가 있다.

마지막으로, 최근에 경험하고 있는 기초자료의 비정형성과 대형화를 고려하면 빅데이터와 머신러닝 기술을 활용하여 기초자료를 수집하거나 시나리오 개발에 적용하는 것은 새로운 연구기회가 될 수 있다. 최신의 빅데이터 수집기술과 축적된 자료를 단시간에 분석할 수 있는 인공지능 기술을 수자원 관리에 적용할 경우, 실시간 자동화 및 통합 시스템이 구축되어 보다 효율적인 의사결정에 도움이 될 것이다. 본 연구도 기초자료 수집을 위해 빅데이터 처리 및 머신러닝 기법을 적용하면, 다양한 형태로 시나리오를 개발할 수 있고 더욱 정교한 분석이 가능해질 것으로 예상한다. 특히 물 관련 재난에 대한 안전성 향상, 물 자원 보안 강화, 재난 예방에 따른 손실 감소, 사용자를 위한 서비스 품질 향상, 업무 효율화로 인한 공공시설의 수입 증대와 관련한 분석이 추가로 수행될 수 있어 이와 관련한 후속 연구가 계속 진행되기를 기대한다.

참 고 문 헌

김연주, 김익재, 안종호, 한대호, 공인혜, 「지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (Ⅰ)」, 한국환경정책평가연구원, 2014.

김연수, 강나래, 정재원, 김형수, “빅데이터와 클라우드 컴퓨팅 기반의 수자원 정보 관리 방안에 관한 검토”, 『한국습지학회』, 제18호 1집, 2016, pp.100-112.

김익재, 안종호, 김연주, 공인혜, 한대호, 「지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구(Ⅱ)」, 한국환경정책평가연구원, 2015.

서울연구원, 「환경기술 혁신이 예견하는 지속가능형 도시정주환경 패러다임」, 세계와 도시 14호, 2017.

안종호, 문현주, 조을생, 한대호,「상하수도시스템의 기후변화 적응전략 및 적응비용 추정 연구」, 한국환경정책평가연구원, 2012.

이서로, 이관재, 한정호, 이동준, 김종건, 임경재, “갈수기 유량 확보에 따른 섬강 및 남한강 본류 갈수기 수질 개선 효과 분석”,『Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers』, 제61호 2집, 2019, pp.25-35.

이창희, 박경옥, “수질오염총량을 이용한 생태계 수질조절 서비스 가치 평가”,『한국습지학회지』, 제19호 2집, 2017, pp.240-245.

장석환, 오지환,「기후변화대비 4차 산업혁명과 스마트워터그리드」, SWG 특별기고문, 한국스마트워터그리드학회, 2018.

한택환, 이효창, “수질오염물질 감소의 편익 추정 -수질총량제하 가상배출권시장 개념의 적용-”,『자원환경경제연구』, 제23호 4집, 2014, pp.719-746.

K-water 융합연구원,「선제적 물 재해 관리 및 대응을 위한 인공지능 개발 전략 수립」, 2017.

Abbaspour, S., “Water quality in developing countries, south Asia, South Africa, water quality management and activities that cause water pollution”, *IPCBEE*, 15, 2011, pp.94-102.

Ahlvik, L. and Hyytiänen, K., “Value of adaptation in water protection – Economic impacts of uncertain climate change in the Baltic Sea”, *Ecological Economics*, 116, 2015, pp.231-240.

Chiu, M., Hunt, L., and Resh, V. H., “Climate-change influences on the response of macroinvertebrate communities to pesticide contamination in the Scramento River, California watershed”, *Science of the Total Environment* 581-582, 2018, pp.741-749.

Cho, S., Roberts, R. K., and Kim, S. G., “Negative externalities on property vlaues resulting from water impairment: The case of the Pigeon River Watershed”, *Ecological Economics* 70, 2011, pp.2390-2399.

Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., and Lee, M., “Managing the health effects of climate change: lancet and University College London Institute for Global Health Commission”, *The Lancet* 373(9676), 2009, pp.1693-1733.

Duarte, R., Pinilla, V., and Serrano, A., “The Spanish Food Industry on Global Supply Chains and Its Impact on Water Resources”, *Water* 7(1), 2015, pp.132-152.

Evans, C. D., Monteith, D. T., and Cooper, D. M., “Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental

impacts", *Environmental pollution* 137(1), 2005, pp.55-71.

Gordon, P., Park, J., and Richardson, H. W., "Modeling input-output impacts with substitutions in the household sector: A numerical example", *Economic Modelling* 23(3), 2009, pp.696-701.

Hoekstra, A. Y. and Mekonnen, M. M., "The water footprint of humanity", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(9), 2012, pp.3232-3237.

IPCC, "Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C", An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press, 2018.

Karauzas, I., Smeti, E., Vourka, A., Vardakas, L., Mentzafou, A., Tornés, E., Sabater, S., Muños, I., Th. Skoulikidis, N., and Kalogianni, E., "Assessing the ecological effects of water stress and pollution in a temporary river – Implications for water management", *Science of the Total Environment* 618, 2018, pp.1591-1604.

Paerl, H. W., and Paul, V. J., "Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria", *Water research* 46(5), 2012, pp.1349-1363.

Park J. and Richardson H. W., "Refining the Isard Multiregional Input-Output Model: Theory, Operationality and Extensions," pp. 35-54 In: Nijkamp P., Rose A., Kourtit K. (eds) *Regional Science Matters*. Springer, Cham, 2015.

Park, J., Gordon, P., Moore II, J. E., and Richardson, H. W., "A New Approach to Quantifying the Impact of Hurricane-Disrupted Oil Refinery Operations Utilizing Secondary Data", *Group Decision and Negotiation* 26(6), 2017, pp.1125-1144.

Wei, J., Wei, Y., and Western, A., "Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011", *Global Environmental Change* 42, 2017, pp.82-92.

White, D. J., Feng, K., Sun, L., and Hubacek, K., "A hydro-economic MRIO analysis of the Haihe River Basin's water footprint and water stress", *Ecological*

Modelling 318, 2015, pp.157-167.

Wu, Z., Guo, X., Lv, C., Wang, H., and Di, D., "Study on the quantification mehod of water pollution ecological compensation standard based on emergy theory", *Ecological Indicators* 92, 2018, pp.189-194.

Yang, Y. S. and Wang, L., "A Review of Modelling Tools for Implementation of the EU Water Framework Directive in Handling Diffuse Water Pollution", *Water Resource Management* 24, 2010, pp.1819-1843.

Zeng, Y., Cai, Y., Tan, Q., and Dai, C., "An integrated modeling approach for identifying cost-effective strategies in controlling water pollution of urban watersheds", *Journal of Hydrology* 581, 2020, pp.124373.

<Abstract>

How to effectively manage water resource responding to climate change

- an approach to economic loss estimation stemming from water pollution and the cleaning cost -

ChangKeun Park

Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University

Doingin Cho

MUREPA Korea

Ga Young Choi

Division of Climate Technology Cooperation, Green Technology Center Korea

Jae Ryoung Song

Division of Climate Technology Cooperation, Green Technology Center Korea

Jongook Lee

University at Buffalo, The State University of New York

Jiyoung Park

University at Buffalo, The State University of New York / Seoul National University

The purpose of this study is to suggest a new criterion to be applied for the future water management, using a new economic model that measures economic losses associated with climate change and the future uncertainty stemming from the climate change. Especially, because climate change affects regions and classes differently, it is important to account for social, economic and natural systems both globally and locally, which ensures the cost allocations to each

area and social classes in terms of water management. To achieve the goal, this study introduced new studies conducted in the water management field associated with climate change and applied a new macro-economic model, flexible input-output model (FlexIO), that measures economic losses stemming from water pollution and the cleaning cost after combining with RCP scenarios (4.5 and 8.5) and two future years of 2030 and 2050 multi-regional input-output models. The results are expected to provide valid information on the cost allocation needed for water cleaning. This study can contribute to preparing proper, realistic financial allocation at the national and local levels at the current point for water management by measuring the future benefit of water management by sector and by region.

Key Words : Climate Change, Water Pollution, Water Management, FlexIO, Future Economic Model

논문접수일 : 2019.11.18.
심사완료일 : 2019.12.26.
게재확정일 : 2019.12.26.

부 록

〈부록표 1〉 2030년 수질오염 개선사업(RCP 4.5)의 경제적 파급효과(백만원)

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
1	29	27	20	40	5	78	60	232	59	127	149	83	144	113	40	9	1,216
2	22	20	15	30	4	57	44	172	44	94	111	61	106	84	29	7	900
3	963	886	655	1,318	169	2,553	1,975	7,656	1,960	4,192	4,924	2,732	4,741	3,718	1,311	291	40,042
4	404	372	275	554	71	1,072	830	3,216	823	1,761	2,068	1,148	1,992	1,562	551	122	16,822
5	448	413	305	614	79	1,189	920	3,566	913	1,953	2,294	1,273	2,208	1,732	611	135	18,654
6	322	297	220	442	56	855	661	2,564	656	1,404	1,649	915	1,588	1,246	439	97	13,413
7	566	521	385	775	99	1,501	1,161	4,503	1,153	2,466	2,896	1,607	2,788	2,187	771	171	23,551
8	98	90	67	135	17	261	202	782	200	428	503	279	484	380	134	30	4,090
9	744	684	506	1,018	130	1,972	1,525	5,914	1,514	3,238	3,804	2,111	3,662	2,873	1,012	225	30,934
10	170	156	115	232	30	450	348	1,349	345	739	868	481	835	655	231	51	7,056
11	495	456	337	678	87	1,313	1,016	3,938	1,008	2,156	2,533	1,406	2,439	1,913	674	150	20,598
12	17	16	12	23	3	45	35	136	35	75	88	49	84	66	23	5	712
13	2	2	1	3	0	5	4	16	4	9	10	6	10	8	3	1	83
14	12	11	8	16	2	31	24	92	23	50	59	33	57	45	16	3	480
15	17	16	12	23	3	45	35	136	35	75	88	49	84	66	23	5	712

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
16	57	52	39	78	10	151	116	451	116	247	290	161	280	219	77	17	2,361
17	205	189	140	281	36	544	420	1,630	417	893	1,048	582	1,009	792	279	62	8,526
18	17	16	12	24	3	46	35	137	35	75	88	49	85	66	23	5	715
19	40	37	27	54	7	105	81	316	81	173	203	113	196	153	54	12	1,651
20	20	18	14	27	3	53	41	159	41	87	102	57	98	77	27	6	830
21	31	29	21	43	5	83	64	250	64	137	161	89	155	121	43	9	1,306
22	28	26	19	39	5	75	58	225	58	123	144	80	139	109	38	9	1,175
23	33	30	22	45	6	87	68	262	67	143	168	93	162	127	45	10	1,369
24	8	7	5	10	1	20	15	60	15	33	38	21	37	29	10	2	313
25	11	10	8	16	2	30	23	90	23	50	58	32	56	44	15	3	473
26	581	535	396	796	102	1,542	1,192	4,623	1,184	2,532	2,973	1,650	2,863	2,246	791	176	24,182
27	16	15	11	22	3	43	33	128	33	70	82	46	79	62	22	5	669
28	13	12	9	17	2	34	26	101	26	55	65	36	63	49	17	4	528
29	38	35	26	52	7	101	78	303	78	166	195	108	188	147	52	12	1,586
30	516	475	351	707	90	1,368	1,058	4,103	1,050	2,247	2,639	1,464	2,541	1,993	702	156	21,461

〈부록표 2〉 2030년 수질오염 개선사업(RCP 8.5)의 경제적 파급효과(백만원)

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
1	13	12	9	18	2	35	27	106	27	58	68	38	65	51	18	4	553
2	10	9	7	13	2	26	20	78	20	43	50	28	48	38	13	3	409
3	438	403	298	599	77	1161	898	3,481	891	1,906	2,239	1,243	2,156	1,691	596	132	18,209
4	184	169	125	252	32	488	377	1,463	374	801	941	522	906	710	250	56	7,650
5	204	188	139	279	36	541	418	1,622	415	888	1,043	579	1,004	788	278	62	8,482
6	147	135	100	201	26	389	301	1,166	299	639	750	416	722	566	200	44	6,099
7	257	237	175	353	45	683	528	2,048	524	1,121	1,317	731	1,268	995	351	78	10,710
8	45	41	30	61	8	119	92	356	91	195	229	127	220	173	61	14	1,860
9	338	311	230	463	59	897	694	2,689	688	1,473	1,730	960	1,665	1,306	460	102	14,067
10	77	71	53	106	14	205	158	613	157	336	395	219	380	298	105	23	3,208
11	225	207	153	308	39	597	462	1,791	458	981	1,152	639	1,109	870	307	68	9,367
12	8	7	5	11	1	21	16	62	16	34	40	22	38	30	11	2	324
13	1	1	1	1	0	2	2	7	2	4	5	3	4	3	1	0	38
14	5	5	4	7	1	14	11	42	11	23	27	15	26	20	7	2	218
15	8	7	5	11	1	21	16	62	16	34	40	22	38	30	11	2	324
16	26	24	18	35	5	68	53	205	53	112	132	73	127	100	35	8	1,074
17	93	86	63	128	16	247	191	741	190	406	477	265	459	360	127	28	3,877

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
18	8	7	5	11	1	21	16	62	16	34	40	22	38	30	11	2	325
19	18	17	12	25	3	48	37	144	37	79	92	51	89	70	25	5	751
20	9	8	6	12	2	24	19	72	18	40	46	26	45	35	12	3	377
21	14	13	10	20	2	38	29	114	29	62	73	41	70	55	19	4	594
22	13	12	9	18	2	34	26	102	26	56	66	36	63	50	17	4	534
23	15	14	10	21	3	40	31	119	30	65	77	42	74	58	20	5	623
24	3	3	2	5	1	9	7	27	7	15	17	10	17	13	5	1	142
25	5	5	4	7	1	14	11	41	11	23	26	15	25	20	7	2	215
26	264	243	180	362	46	701	542	2,102	538	1,151	1,352	750	1,302	1,021	360	80	10,997
27	7	7	5	10	1	19	15	58	15	32	37	21	36	28	10	2	304
28	6	5	4	8	1	15	12	46	12	25	30	16	28	22	8	2	240
29	17	16	12	24	3	46	36	138	35	76	89	49	85	67	24	5	721
30	235	216	160	321	41	622	481	1,866	478	1,022	1,200	666	1,155	906	319	71	9,759

〈부록표 3〉 2050년 수질오염 개선사업(RCP 4.5)의 경제적 파급효과(백만원)

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
1	36	34	25	50	6	97	75	290	74	159	186	103	179	141	50	11	1,515
2	29	27	20	40	5	77	60	231	59	126	149	82	143	112	40	9	1,208
3	1,279	1,177	871	1,751	224	3,391	2,623	10,170	2,604	5,569	6,541	3,630	6,298	4,940	1,741	386	53,194
4	534	491	363	731	93	1,415	1,094	4,243	1,086	2,323	2,729	1,514	2,627	2,061	726	161	22,191
5	592	544	403	810	104	1,569	1,213	4,704	1,204	2,576	3,025	1,679	2,913	2,285	805	179	24,604
6	430	395	292	588	75	1,139	881	3,415	874	1,870	2,197	1,219	2,115	1,659	585	130	17,864
7	750	690	511	1,028	131	1,990	1,539	5,967	1,528	3,267	3,838	2,130	3,695	2,898	1,022	227	31,211
8	129	118	88	176	23	341	264	1,022	262	560	657	365	633	497	175	39	5,347
9	986	907	671	1,350	173	2,615	2,023	7,842	2,008	4,294	5,043	2,799	4,856	3,809	1,342	298	41,016
10	223	206	152	306	39	592	458	1,776	455	973	1,142	634	1,100	863	304	67	9,290
11	656	604	447	899	115	1,741	1,346	5,220	1,336	2,858	3,357	1,863	3,232	2,535	894	198	27,304
12	20	18	13	27	3	52	40	157	40	86	101	56	97	76	27	6	820
13	2	2	1	3	0	6	4	17	4	9	11	6	10	8	3	1	87
14	12	11	8	16	2	31	24	94	24	52	61	34	58	46	16	4	492
15	20	18	13	27	3	52	40	155	40	85	100	55	96	75	27	6	811
16	75	69	51	102	13	198	153	593	152	325	382	212	367	288	102	23	3,104
17	271	250	185	372	48	719	556	2,157	552	1,181	1,388	770	1,336	1,048	369	82	11,284

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
18	18	17	13	25	3	49	38	146	37	80	94	52	90	71	25	6	764
19	45	42	31	62	8	121	93	361	93	198	232	129	224	176	62	14	1,890
20	23	21	15	31	4	60	46	180	46	99	116	64	111	87	31	7	941
21	32	30	22	44	6	85	66	256	66	140	165	91	159	124	44	10	1,341
22	32	30	22	44	6	86	66	257	66	141	165	92	159	125	44	10	1,344
23	37	34	25	51	7	99	76	296	76	162	190	106	183	144	51	11	1,546
24	8	8	6	12	1	23	17	68	17	37	43	24	42	33	12	3	353
25	12	11	8	17	2	33	25	99	25	54	63	35	61	48	17	4	515
26	774	712	527	1,060	136	2,053	1,588	6,156	1,576	3,371	3,959	2,197	3,812	2,990	1,054	234	32,200
27	18	17	12	25	3	49	38	146	37	80	94	52	90	71	25	6	761
28	14	13	9	19	2	37	28	110	28	60	71	39	68	54	19	4	576
29	47	44	32	65	8	126	97	377	96	206	242	134	233	183	65	14	1,971
30	685	630	466	937	120	1,815	1,404	5,443	1,393	2,981	3,501	1,943	3,371	2,644	932	207	28,471

〈부록표 4〉 2050년 수질오염 개선사업(RCP 8.5)의 경제적 파급효과(백만원)

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
1	41	37	28	56	7	108	84	324	83	177	208	116	201	157	55	12	1,695
2	32	30	22	44	6	86	67	258	66	141	166	92	160	125	44	10	1,351
3	1,431	1,316	974	1,959	251	3,793	2,934	11,376	2,912	6,229	7,316	4,060	7,044	5,525	1,947	432	59,501
4	597	549	406	817	105	1,583	1,224	4,746	1,215	2,599	3,052	1,694	2,939	2,305	812	180	24,822
5	662	609	450	906	116	1,755	1,357	5,262	1,347	2,881	3,384	1,878	3,258	2,556	901	200	27,521
6	480	442	327	658	84	1,274	985	3,820	978	2,092	2,457	1,364	2,366	1,856	654	145	19,982
7	839	772	571	1,149	147	2,226	1,722	6,675	1,709	3,655	4,293	2,382	4,133	3,242	1,143	254	34,911
8	144	132	98	197	25	381	295	1,143	293	626	735	408	708	555	196	43	5,981
9	1,103	1,015	751	1,510	193	2,925	2,262	8,772	2,246	4,803	5,641	3,131	5,432	4,260	1,502	333	45,879
10	250	230	170	342	44	663	512	1,987	509	1,088	1,278	709	1,230	965	340	75	10,392
11	734	676	500	1,005	129	1,947	1,506	5,839	1,495	3,197	3,755	2,084	3,616	2,836	1,000	222	30,541
12	22	20	15	30	4	58	45	175	45	96	113	63	109	85	30	7	917
13	2	2	2	3	0	6	5	19	5	10	12	7	11	9	3	1	97
14	13	12	9	18	2	35	27	105	27	58	68	38	65	51	18	4	551
15	22	20	15	30	4	58	45	173	44	95	112	62	107	84	30	7	907
16	83	77	57	114	15	221	171	664	170	363	427	237	411	322	114	25	3,472
17	303	279	207	416	53	805	622	2,413	618	1,321	1,552	861	1,494	1,172	413	92	12,622

	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	전국
18	21	19	14	28	4	54	42	163	42	89	105	58	101	79	28	6	854
19	51	47	35	70	9	135	104	404	103	221	260	144	250	196	69	15	2,115
20	25	23	17	35	4	67	52	201	52	110	129	72	125	98	34	8	1,053
21	36	33	25	49	6	96	74	287	73	157	184	102	178	139	49	11	1,500
22	36	33	25	49	6	96	74	287	74	157	185	103	178	140	49	11	1,503
23	42	38	28	57	7	110	85	331	85	181	213	118	205	161	57	13	1,729
24	10	9	6	13	2	25	19	76	19	41	49	27	47	37	13	3	395
25	14	13	9	19	2	37	28	110	28	60	71	39	68	54	19	4	576
26	866	797	590	1,186	152	2,296	1,776	6,886	1,763	3,771	4,429	2,458	4,264	3,345	1,179	262	36,018
27	20	19	14	28	4	54	42	163	42	89	105	58	101	79	28	6	851
28	15	14	11	21	3	41	32	123	32	67	79	44	76	60	21	5	644
29	53	49	36	73	9	141	109	421	108	231	271	150	261	205	72	16	2,205
30	766	705	521	1,048	134	2,030	1,570	6,089	1,559	3,334	3,916	2,173	3,770	2,957	1,042	231	31,846