

수질오염물질 감소의 편익 추정 -수질총량제하 가상배출권시장 개념의 적용-[†]

한택환*·이효창**

요약 : 본 연구는 수질오염물질에 대한 가상적 배출권거래시장을 상정하여 균형배출권가격을 도출함으로써 수질개선에 따른 편익을 추정하려고 시도하였다. 우리나라에서는 낙동강수계를 비롯하여 주요 수계에 수질오염물질 총량관리제도가 실시되고 있다. 사회적으로 바람직스러운 배출총량을 결정함으로써 국민과 정부는 암묵적으로 수질오염물질의 경제적 가치를 결정한 것과 같다고 할 수 있다. 각 지자체별로 수질오염물질 배출상의 제약으로 인하여 희생된 경제적 기회비용이 발생할 것이며 이 기회비용의 크기가 수질오염물질의 경제적 가치이기 때문이다. 이 가상적 배출권거래시장에서의 균형가격을 수질 총량제하의 수계전체의 배출총량과 지자체별 할당에 의하여 암묵적으로 결정된 수질오염물질 배출의 단위당 가치라고 해석할 수 있다. 배출량과 편익의 관계로부터 한계순편익함수를 도출하고 지자체별 배출허용총량을 이용하여 개별배출권 초과수요함수를 구성하여 균형배출권가격을 도출하였다. 추정 결과 배출권시장의 균형배출권가격이 1,409.3원/kg-BOD로 추산되었다. 이는 외국의 사례와 비교하여 적절한 수준이라 평가되며 이러한 배출권가격은 수질 오염물질의 단위당 경제적 가치를 산정하여 수질 변화를 수반하는 사업의 B/C분석에 직접적으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 가상적 배출권 거래 시장 개념, 수질오염 배출권거래제도, 낙동강수계 수질오염총량관리제, 배출권가격 추정

JEL 분류 : C30, Q25, Q52, Q53

접수일(2014년 4월 9일), 수정일(2014년 9월 20일), 게재확정일(2014년 9월 20일)

[†] 본 연구는 저자 중 1명(한택환)이 연구책임자로 수행한 연구과제 한국환경공단, 『하수처리수의 공업용수 재이용사업 비용편익 분석기준 연구』, 2010.5. 연구보고서의 일부 내용을 바탕으로 대폭적으로 수정 보완한 것이며, 2010년 한국환경정책정보학회 추계학술대회에서 발표된 내용과 2011년 한국환경경제학회에서 발표된 내용을 발전시킨 것이다. 논문을 위해 고견을 주신 수자원정책경제연구소의 류문현 박사님과 서울대학교 권오상 교수님, 산업연구원의 한기주 박사님께 감사의 말씀을 드린다. 또한 본 논문의 심사과정에서 오류를 지적하여 주고 논문을 발전시키는 데에 큰 도움을 주신 두 분의 익명의 심사위원께도 심심한 사의를 표한다. 물론, 남아 있는 모든 오류는 저자들의 책임이다.

* 서경대학교 금융경제학과 교수, 제1저자(e-mail: twhan@skuniv.ac.kr)

** 서경대학교 외래교수, 교신저자(e-mail: hyolee14@naver.com)

Valuation of the Water Pollution Reduction: An Application of the Imaginary Emission Market Concept

Tak-Whan Han* and Hyo Chang Lee**

ABSTRACT : This study attempts to estimate the value of the water quality improvement by deriving the equilibrium price of the water pollutant emission permit for the imaginary water pollutant emission trading market.

It is reasonable to say that there is already an *implicit* social agreement for the unit value of water pollutant, when the government set the Total Water Pollutant Loading System for the major river basin as a part of the Comprehensive Measures for Water Management, particularly for the Nakdong River Basin. Therefore, we can derive the unit value of water pollutant emission, which is *already implied* in the pollution allowance for each city or county by the Total Water Pollutant Loading System. Once estimated, it will be useful to the economic assessment of the water quality related projects.

An imaginary water pollutant emission trading system for the Nakdong River Basin, where Total Water Pollutant Loading System is already effective, is constructed for the estimation of the equilibrium price of water pollutant permit. By estimating marginal abatement cost curve or each city or county, we can compute the equilibrium price of the permit and then it is regarded as the economic value of the water pollutant. The marginal net benefit function results from the relationship between the emission and the benefit, and then the equilibrium price of permit comes from constructing the excess demand function of the permit by using the total allowable permit of the local government entity.

The equilibrium price of the permit would be estimated to be 1,409.3won/kg-BOD. This is within reasonable boundary compared for the permit price compared to foreign example. This permit price would be applied to calculate for the economic value of the water quality pollutants, and also be expected to use directly for the B/C analysis of the business involved with water quality change.

Keywords : Imaginary emission trading system, Water pollutant emission trading system, Total water pollutant loading system of the nakdong river basin, Estimation of the permit price

Received: April 9, 2014, Revised: September 20, 2014, Accepted: September 20, 2014.

* Seo-Kyeong University, Department of Economics and Finance(e-mail: twhan@skuniv.ac.kr)

** Seo-Kyeong University, Department of Economics and Finance(e-mail: hylee14@naver.com)

I. 서론

수질 관련 가치평가를 위한 방법론으로서 수질개선 혹은 악화에 대한 선호진술(stated preference) 기법(CVM 등)이 주로 사용되어 오고 있다. 선호진술법에 의한 가치평가는 어떠한 지역이나 수계의 수질의 총체적인 상태를 비교하여 악화를 방지하기 위한 지불의사나 개선을 포기할 때의 수취의사 등을 추정하는 것이다. 그러나 하수재처리 사업과 같은 수질개선 사업의 환경개선 성과를 경제적으로 가치평가하는 데에 CVM 등 선호진술 기법으로 추정하는 데에는 문제가 따른다. 왜냐하면 수질개선사업의 성과는 1차적으로 수질오염물질배출량의 감소로 나타나며 이것이 선호진술기법으로 평가가능한 수질의 변화로 나타나기 위하여서는 오염물질 농도의 변화와 그에 따른 여러 가지 화학적 생태적 수문학적 과정을 거치기 때문이다. 이보다는 직접적으로 수질오염물질 배출량 단위당 가치가 얼마인지를 추정할 수 있다면 훨씬 유용할 것이다.

수질 관련 사업에 따른 수질오염물질 배출량의 변화를 의사결정 과정에 정당하게 반영하기 위하여서는 이 수질오염물질 배출량 변화의 경제적 가치평가에 대한 방법론이 확립되어야 한다. 본 연구는 수질오염물질 한 단위의 저감의 경제적 가치평가를 가상적 수질배출권시장을 상정하여 이 배출권 가격을 계산함으로써 시도하고자 한다.

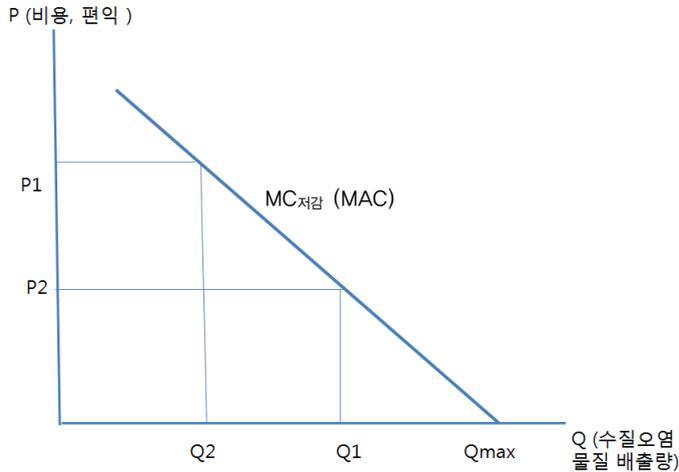
수질배출권의 가격은 수질오염물질 배출량 저감의 수요 측면(지불의사)과 공급측면(수취의사, 비용측면)을 동시에 고려한 개념이다. 이 추정방법은 온실가스 배출권 가격이 온실가스 배출량 저감 1단위의 가격이자 가치로 이해되는 것과 동일한 논리에서 수질오염물질 배출량 변화의 가치를 추정하는 것이라고 할 수 있다.

수질 분야에서는 배출권거래의 시행이 아직 드물며 배출저감 활동의 경제적 가치에 대한 구체적 인식이 아직 미약한 편이다. 우리나라 역시 체계적인 수질 배출권의 거래가 이루어지고 있지는 않다. 그러나 배출권거래의 기반이 될 수도 있는 수질 오염총량 규제가 시행되고 있다. 수질오염 총량 규제는 수질오염물질의 배출과 그에 수반되는 경제활동에 제약을 가져온다. 각 지자체별로 수질오염물질 배출상의 제약으로 인하여 희생된 경제적 기회비용이 발생할 것이며 이 기회비용의 크기가

수질오염물질의 경제적 가치이다. 이 기회비용의 크기는 지자체마다 상이할 것이다. 이 지자체별로 상이한 기회비용의 크기를 전체적으로 포괄하는 공통의 크기를 추정하기 위하여서 총량제하에서 지자체간에 가상적인 배출권거래제도를 실시한다고 상정하고 균형배출권가격을 계산하였다.

사실, 수질오염 총량규제를 실시하면서 각 지자체별로 배출총량을 결정할 때, 이미 수질오염물질의 단위당 가치는 암묵적으로 결정되었다고 할 수 있다. 이러한 관계를 도시하면 다음과 같다.

〈그림 1〉 수질오염물질 총량과 수질오염물질 배출저감의 경제적 가치



수계 내의 수역(지자체)의 수질오염물질의 한계저감비용곡선이 알려져 있다고 가정하자. 수질오염물질 배출 **저감**의 한계비용(=한계저감비용, MAC: marginal abatement cost)은 수질오염물질 **배출**의 한계편익(MB: marginal benefit)과 동일한 의미를 가진다. 특정 수역에서 수질오염물질의 허용 배출총량이 위의 그림 1의 Q1 및 Q2로 주어져 있다면 수질오염물질 저감의 한계비용곡선(즉, 수질오염물질 배출의 한계편익곡선)을 통하여 허용된 배출량을 배출할 때 그에 상응하는 수질오염물질의 배출의 단위당 경제적 가치인 P1 및 P2를 대응시킬 수 있다. 이와 같이 수질오염물질 배출총량을 결정하는 것은 암묵적으로 수질오염물질 저감의 경제적 가치를 결정하

는 것과 동일한 의미를 가지고 있다.¹⁾ 각 지자체별로 허용된 배출총량에 상응하는 오염물질 저감의 경제적 가치의 크기는 모두 상이하다. 각 지자체별로 상이한 수질 오염물질 저감의 경제적 가치를 대표하는 단일한 값은 배출권의 거래가 허용되는 것을 상정했을 때의 배출권 가격이라고 할 수 있다.

생물학적산소요구량(BOD, Biological Oxygen Demand, 이하 BOD로 표기)에 대한 가상적인 배출권 거래시장을 상정하고 그 가격을 추정할 수 있다면, 수질오염물질 배출량 변화의 화폐적 가치는 배출권 가격에 수질관련 사업으로 인한 BOD 저감 총량을 곱해줌으로써 계산될 수 있을 것이다.²⁾ 본 연구는 수질 총량제가 실시되고 있는 낙동강 수계를 대상으로 2005년의 개발계획 데이터와 시군별 지가 및 GRDP 데이터를 이용하여 수질오염물질(BOD) 배출권의 가상적 가격의 계산을 시도하였다. 그리고 산출된 BOD 배출량 1단위(1kg)의 값을 이용하여 특정 수질 관련 사업(하수재처리 사업)의 수질오염물질 저감 편익의 화폐적 가치의 계산을 시도하였다.

II. 가상적 배출권가격 모형

1. 선행 연구

관련 선행 연구로는 김홍배·김영민(2011)이 있다. 이들은 수질 총량제 시행 이후 수질 변화를 산업연관분석 모형을 통하여 제시하였다. 또한 환경부문이 내생화된 산업연관분석 모형을 통하여 배출권 가격이 결정될 수 있는 틀을 제시하고, 총량제를 통한 지역별 환경투입비용의 변화를 추정함으로써 배출권거래제도의 타당성을

1) 이렇게 배출권의 가격으로 추정된 수질오염물질 1단위의 가치와 CVM 등으로 추정된 지불의사 총액은 개념적으로 완전히 일치하지는 않으며 수치상으로도 차이가 많을 것으로 생각된다. 따라서 가상적 배출권 가격의 추정을 통하여 계산된 수질오염물질 저감의 가치와 CVM 등으로 추정된 가치를 직접적으로 비교하는 것은 적절치 않다. 양자의 관계는 이론적, 실증적 차원에서 규명되어야 할 주제이지만 본 논문의 범위에서 벗어나는 것으로서 추후의 연구가 기대된다.

2) 가상적 배출권 거래가격의 추정에 있어서 배출권 거래가 완전히 가상적인 것은 아니다. 자치단체 간 거래의 사례로써 경주와 청도 간의 사실상의 배출권거래가 있었다. 청도에는 일당 77kg의 개발 부하량이 주어졌으나 경주에는 주어지지 않았는데, 청도가 경주에 10kg/일을 이전한 것이다. 경주시는 당초에 현금 지급을 고려하였으나 경주시 개발사업 정보공개 및 오염최소화, 개발부하량 확보 시 즉각 반환, 추후 청도군의 부하확보 지원 등의 조건으로 이전하였다. 문현주(2009) 참조.

보여주었으나, 실제로 배출권 가격을 계산하지는 않았다.

Hernandez-Sancho et al.(2010)에서는 산출물거리함수 모형에 의한 스페인 하수 처리시설의 오염물질의 잠재가격(shadow price)을 추정하는 방법론을 채택하여 COD/BOD 가치(사실상의 처리비용)가 kg당 0.1유로(약 150원) 이하로 추정되었다. 이 추정결과는 시설 수준에서의 산출물거리함수를 이용한 생산효율성 극대화모형에서 잠재가격을 도출한 것이다. 즉, 이 잠재가격은 한계저감비용과 유사한 개념이지만, 시설 단위의 개념이며, 오염 저감에 따른 경제 전체의 기회비용을 반영하지 못하고 있다는 단점이 있다. 한편 우리나라에서 적용되는 플랜트에서의 BOD 저감 비용은 문현주(2009)에 의하면 kg당 약 6,000원 정도인 것으로 계산되었다.

해외 수질배출권거래 사례로서 미국 노스캐롤라이나 주의 Albemarle-Pamlico 하구 지역의 오염물질 유입 저감을 위한 제도가 있다. 1989년 주정부는 오염물질 규제 강화조치를 취했는데 주로 비점오염원을 대상으로 하였다. 영양(오염)물질 톤당 56달러로 거래된 사례가 존재하는데, 비점오염원 통제를 위한 펀드를 조성하고 배출 오염물질 kg당 56달러가 지불되었으며, 2011년 가격으로 적어도 10만 원 이상이 되는 것으로 추정되었다.³⁾ Hall/Howitt(1995) 와 Field(1997)는 수질 오염배출권 가격에 관한 Pamlico 사례에 관한 연구에서 플랜트 수준의 최적화가 최저비용 옵션이며, 그 다음이 배출권 거래이고(kg당 56달러), 고도 폐수처리는 가장 마지막의 고비용 옵션이라고 분석하고 있다.

2. 모형 추정을 위한 데이터 및 접근 방법

본 연구에서는 수질오염물질 총량제가 실시되고 있는 낙동강 수계에서 배출권거래제도가 시행된다는 것을 가상적으로 상정하여 이 가상적 배출권거래시장에서의 배출권가격을 추정하여 환경개선의 편익을 추정하고자 하였다.

수질 총량제가 실시되고 있는 낙동강 수계의 총량 관리 단위는 다음 그림 2에 나타나 있는 바와 같이 경상남북도, 대구광역시, 부산광역시, 울산광역시, 강원도, 전라북도 등에 걸쳐 있다. 가상적인 배출권 가격을 추정하는 데 사용되는 기본적인 데

3) Field(1997).

이터는 낙동강수계관리위원회에서 작성한 『낙동강 수계 오염총량관리 기본계획』(2005)에 있는 데이터들이다. 각 지방자치단체에서 추진 중인 각종 개발계획들 중 하천수계에 영향을 미치는 개발계획 목록을 정리하여 도시(재)정비계획서, 하수도 정비기본계획 등의 관련 자료를 참고 조사하였다. 각 개발계획 자료들은 목표연도의 오염부하량 예측에 직접적으로 사용되기도 하고, 상수도계획과 하수도정비기본계획과 같이 향후 인구추정, 상·하수량 추정과 하수도처리구역의 확대 등에 관한 대조확인 참고자료로 사용하였다.⁴⁾ 개발계획의 시간적 범위는 준공 예상연도가 2010년까지인 개발계획들만 포함되었다.

이 개발계획에 의거하여 수질오염물질 배출 부하량이 계산된다. 배출량은 개발계획표에서 인구 부하량, 토지 부하량, 산업 및 축산 부하량의 부하량 중 발생 부하량이 아니라 여러 가지 방식으로 처리되지 못하고 실제로 외부로 배출된 배출 부하량을 배출량으로 간주하여 합산하여 계산하였다.⁵⁾

개발계획에 포함된 정보의 의미는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 개발계획은 시군이 제출한 것으로서 어느 정도의 타당성 평가가 시행된 상태일 것으로 간주한다. 둘째, 타당성평가에서 타당한 것으로 평가된 사업을 수행할 것이므로 각 지자체의 개발 사업들은 순현재가치가 0보다 크다고 보아야 할 것이다. 그러나 타당성평가를 통과하였어도 대개 순현재가치가 0보다 작은 사업도 많은 현실을 감안할 때, 평균적으로 개별 사업의 순현재가치가 0, 즉 내부수익률이 할인율과 같다고 가정한다. 셋째, 개발계획상의 토지사용, 배출량 등은 최적화된 상태라고 가정한다. 넷째, 배출량이 지나치게 큰 사업은 지양되었을 것이며, 배출량이 크더라도 편익이 큰 사업은 채택되었을 것이다. 즉, 이 개발계획은 배출량에 대한 부과금이나 배출권가격 등이 존재하지 않지만, 그와 유사한 의사결정 규칙을 전제로 수립된 것이라고 가정한다. 다섯째, 이 데이터는 순편익 극대화의 행동을 가정한 상황에서 생성되었다고 볼 수 있다. 여기서 의사결정 주체는 지자체이므로 순편익은 사적인 순편익만이 아니라 공공의 순편익도 포함된다. 그러나 수질개선과 관련한 편익은 제외된다. 여섯째, 배출량은 토지와 더불어 편익의 생산요소이다. 즉, 개발 사업

4) 전계서, p2-1.

5) 전계서 p2-3~2-11 참조.

의 산출은 순편익이며, 여기에 투입되는 생산요소는 토지서비스와 자본, 그리고 수질오염물질 배출(수자원서비스의 이용)이다. 일곱째, 토지투입이 일정 배출량을 전제로 최적화되는 수학적 조건을 찾아내고, 이로부터 배출량에 따른 편익함수와 한계편익함수를 찾아낼 수 있다. 여덟째, 배출량 단위당 저감비용이 존재하고 이 저감비용은 배출량의 경제적 한계저감비용과는 상이하며 기술적인 단위당 저감비용으로 가정한다. 이 가정은 개별 사업에서 배출량에 대하여 소정의 저감비용이 발생한다는 가정이다. 이 비용에는 기술적 저감비용, 배출부과금 납부, 배출규제로부터 발생하는 제반비용을 포함한 것이며 개발 프로젝트의 산출량 감소 옵션으로부터 발생하는 비용은 제외된 것이다.

본 논문에서는 가상적 배출권시장을 설정하고 배출권 수요함수를 추정하여 그 가상적 균형배출권 가격을 계산하여 수질오염물질배출의 단위당 가치를 다음과 같은 순서로 추정하고자 한다. 먼저 단계 1에서 토지투입과 배출량의 함수인 순편익함수를 설정한다. 단계 2에서 토지투입에 대한 1계 조건을 도출한다.

〈그림 2〉 낙동강 수계 총량 단위 관리구역



그리고 단계 3에서는 배출량의 함수로서의 순편익 함수를 도출하고 통계적으로 추정한다. 단계 4에서 한계순편익함수를 도출하고 이로부터 배출권 수요함수를 도출한다. 단계 5에서는 수질배출 할당량을 도입하여 시군별 개별 배출권 초과수요함수를 설정한다. 단계 6에서 초과수요의 합이 0이 되도록 시장 균형 조건을 도입하여 균형 배출권 가격을 계산한다. 마지막으로 단계 7에서 이 가격을 BOD·kg/년당 화폐적 가치로 간주하여 특정 수질 관련 사업으로 인한 환경 편익의 변화의 화폐가치를 계산한다.

개별 프로젝트의 수익, 부하량 등의 데이터 처리 과정에 있어서 개발계획의 총지가는 이들 개발계획의 개발면적과 개발시군의 평균지가를 곱하여 산출한다. 이 총지가에 대하여 공공사업의 평균적인 수익률을 곱하여 개별 프로젝트로부터의 수익을 계산한다.⁶⁾ 실제 개별 프로젝트에 투입된 총자산은 토지가액보다 클 것이므로 이렇게 계산된 수익을 실제 수익의 하한치라고 간주한다. 개별프로젝트의 부하량은 단위 프로젝트의 배출 부하량(BOD·kg/년)의 합계를 사용하며 수익은 부하량에 상응하여 증가한다.

3. 가상 배출권 가격 추정 모형의 구조

낙동강 수계 오염총량관리계획에 따른 오염허용총량을 \bar{E} 라고 가정하자. 개별 시군별 지자체의 오염배출량을 E_i 라고 하고 개별 지자체의 오염배출량 단위당 순편익(NB_i)⁷⁾을 다음과 같이 오염배출량의 함수⁸⁾라고 가정하자.

-
- 6) 지가총액은 데이터에 사용된 개발 프로젝트에 투입된 자본총액에 대한 데이터가 없으므로 그에 대한 대응으로 사용된 데이터이다. 지가가 높으면 그 개발 프로젝트에서 수질오염물질 배출 저감 한 단위의 기회비용이 커진다. 왜냐하면 지가가 높으면 평균적인 자본수익율을 적용할 때 이로부터 발생하는 경제적 편익의 크기도 클 것이므로 주어진 기술적 조건하에서는 수질오염물질을 저감하는 데 따른 기회비용도 커지며, 수질오염물질 배출권에 대한 지불의사도 커질 것이다. 여기서 유의할 것은 이 편익가치는 추가적인 오염물질 배출량 한 단위 저감에 대하여 주어진 공급측면에서의 기회비용 개념이지 “수질”의 개선 한 단위에 대한 지불의사가 아니라는 점이다. 수질 오염물질 배출저감의 기회비용과 수질 개선에 대한 수요측면에서의 지불의사와는 분명히 구별되어야 한다.
 - 7) 여기서 순편익은 개념적으로는 지자체 전체의 순편익이다. 그러나 본 실증연구에서는 사용된 데이터상 수질오염 총량제에서 승인된 개발 계획하에서 수질오염물질의 배출이 측정될 수 있는 시설로부터의 순편익이다.
 - 8) 여기서 편익을 오염물질 배출량의 함수로 한 것은 이를 편미분하여 오염물질 배출의 한계편익함수, 즉 오염물질 저감의 한계비용함수를 구하기 위한 것이다. 종속변수에 다른 변수, 즉 GRDP를 설정할 수도 있다. 그러나 우선 GRDP는 부가가치 개념이며, 경제주체가 의사결정을 할 때의 목적함수로 사용되는

$$NB_i = f(E_i, X_i) \tag{1}$$

여기서, X_i 는 오염부하량을 제외한 기타 변수로 개별 시군별로 상이한 시설의 크기 및 종류, 토지가격 혹은 실질소득 등을 포함한다. 또한 상하류와 같은 오염원 위치의 차이 및 오염물질의 이동경로가 편익에 미치는 영향이 상이할 것인데 본 논문에서는 분석의 편의상 오염부하량을 제외한 모든 변수를 기타변수로 일단 간주할 것이다. 배출권 가격에 영향을 줄 수 있는 사회경제적 제비용과 관련된 변수에 대한 확장모형은 더욱 많은 이론적·실증적 연구가 뒤따를 것으로 보이는데 이러한 복잡한 논의는 본 논문의 배출권 가격 추정과 논리적으로 일관성을 잃지 않으면서 양립할 수 있을 것으로 기대한다.

일단 식 (1)을 추정할 다음 추정된 함수를 오염배출량 E_i 에 대해 미분하여 오염부하량이 한 단위 줄어들 경우의 한계순편익, $MNB_i = \frac{dNB_i}{dE_i}$ 를 구한다.

$$MNB_i = \frac{dNB_i}{dE_i} = f'(E_i) \tag{2}$$

이 한계순편익함수는 추가적인 배출량 한 단위로부터 얻어지는 경제적인 편익에 대한 한계지불의사(marginal willingness to pay)를 나타내는 것으로 간주할 수 있다. 그러므로 MNB 는 배출권할당=0일 때의 배출권에 대한 지불의사, 즉 가격을 의미하는 것으로 간주될 수 있다. 따라서 MNB 를 P 로 바꿔 쓰는 것이 가능하다. 이제 식 (2)의 역함수를 구하여 오염배출량을 배출권가격의 함수로 나타내면 다음 식 (3)과 같다. 이 식은 배출권 수요함수로 해석된다.

이윤이나 순편익처럼 행태적 관계를 도출해내기에는 적절하지 않다. 즉, GRDP의 한계치가 무엇을 의미하는지 불분명하다. 그리고 또 하나의 이유는 본 논문의 데이터는 각 지자체가 제출한 2005년 기준 개발계획의 개발 면적 및 배출량 데이터를 사용한 것으로서 이 한정된 프로젝트 수준의 데이터를 GRDP와 연관 짓기는 쉽지 않다. 그러나 GRDP는 배출량을 독립변수로 하는 편익함수에서 추가적인 설명변수로 채택됨으로써 모델의 설명력을 증진시키고 있다. 왜냐하면 배출량과 편익의 관계는 일률적이지는 않을 것이며 주요한 통제변수로서 GRDP가 채택되는 것은 자연스러운 것이기 때문이다.

$$E_i = g(P_i) \quad (3)$$

적절한 배출권 할당시나리오를 작성하여 각 시군별로 배출권 거래를 실시한다고 가정하면 각 지방자치단체 별로 식 (3)과 같은 수요함수를 추정하는 것이 가능하다. 이제 배출권 거래에 관하여 경쟁시장을 가정하면 배출권의 초과수요함수의 합이 0 이 되게 하는 배출권 가격(P^*)의 도출이 가능할 것이며 이는 다음과 같은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n ED_i(P^*) = 0 \quad (4)$$

여기서, $ED_i = E_i - \bar{E}_i$

ED = 초과 배출량

\bar{E} = 배출 할당량

위에서 도출된 배출권 거래시장의 균형가격 P^* 가 바로 수질 개선의 단위당 편익이며 이를 통하여 이미 시행되고 있는 오염물질 총량관리제에서 규정한 지자체별 수질오염물질 배출 허용총량에 합의된 경제적 가치를 추정할 수 있다.

III. 실증분석 모형 추정 및 수질개선 편익 추정

1. 통계적 추정을 위한 순편익함수의 설정 및 데이터

이제 위에서 설명한 추정을 위한 순편익함수 $NB = f(E, X)$ (하첨자 i 는 생략)에서 여타 변수를 대표하는 X 를 정하고 함수형태를 결정하여 통계적 추정을 위한 함수를 설정하여야 한다. 각 지자체별 콤투더글러스 생산함수를 가정하고 이를 바탕으로 순편익함수를 설정하여 개별 지자체가 순편익을 극대화하고 있다는 가정을 전제로 배출량에 대하여 증가함수이면서 오목함수이고 동시에 단위면적당 GRDP의 함수인

콥-더글러스 형태의 순편익 함수가 도출된다. 이 순편익 함수는 다음 식 (5)와 같다 (a 는 상수). 이 함수의 구체적인 유도과정은 <부록 1>에 상세히 설명되어 있다

$$NB = aE^\tau y^\eta \tag{5}$$

실제의 추정은 위의 식 (5)의 양변에 로그를 취한 다음 함수형태로 행한다.

$$\ln NB = \ln a + \tau \ln E + \eta \ln y \tag{6}$$

순편익함수를 회귀분석하기 위하여 낙동강 수계 수질 총량관리 기본 계획에서 시·군별 개발계획의 토지 면적, 배출부하량 데이터와 국토해양부의 공시지가 데이터로부터 얻은 지가 데이터를 참조하였다.⁹⁾ 시·군별 개발 계획은 주어진 지가 하에서 순편익 극대화를 하도록 토지 면적이 결정되었다고 가정하였다. 한편 기초 지자체별 지가 데이터는 국토해양부 내부자료를 사용하였음을 밝혀둔다. 구체적인 데이터는 <부록 표 1>에 정리되어 있다.¹⁰⁾

2. 실증분석 결과

로그 순편익함수 (6)을 통상최소자승법으로 회귀분석한 결과가 다음과 같다.¹¹⁾

$$\begin{aligned} \ln NB &= 10.9570 + 0.90198 \ln E + 0.53881 \ln y \\ s.e. & \quad (1.2081) \quad (0.10301) \quad (0.17961) \\ t-value & \quad (9.0700)^{***} \quad (8.7563)^{***} \quad (2.9971)^{***} \\ no. of obs. &= 48 \quad s.e \text{ of regression} = 2.1042 \quad R^2 = 0.63682 \end{aligned} \tag{7}$$

9) 시군별 배출량 데이터와 배출할당 데이터는 <부표 1> 참조.

10) 개별 시군 자치단체의 순편익 데이터는 개발 대상 토지의 총가액에 공공투자 프로젝트의 할인율을 적용하여 계산하여 얻었다. $NB(s) = rP_L s$. 여기서, $NB(s)$ = 배출시설로부터의 순편익, r 은 해당 프로젝트에서의 토지자산으로부터의 기대수익율인데 5%를 적용하였으며, s 는 토지면적이다. 해당 배출시설의 지가 데이터가 없으므로 실제 실증분석에서는 지가 대신에 단위면적당 GRDP데이터를 사용하였다.

11) 여러 가지 추정식 중 최종적으로 이 식이 채택되었다. 채택 기준은 결정계수와 가장 중요한 변수인 연간 배출량(E)의 유의성이다.

여기서 ***는 유의수준 1%에서 계수가 유의(양측 검정)함을 나타낸다.

예상대로 순편익은 배출량 및 실질소득과 양의 관계를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 로그를 취하여 OLS로 추정을 한 후 이를 다시 원 함수로 전환하여 사용하는 것은 통계학적으로 문제가 있다. 왜냐하면 로그선형모형에서 OLS 방법으로 추정된 파라미터는 불편추정량이지만, 여기에서 추정된 상수항에 역로그(antilog)를 취하여 계산된 지수회귀모형의 상수계수는 불편추정량이 아니다.¹²⁾ 즉, 통계적으로 편익이 존재하게 되므로 이에 대한 조정이 요구된다.

이를 조정하는 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 비선형 회귀분석을 통하여 지수회귀모형을 추정함으로써 로그모형 변환 후 생기는 편익을 원천적으로 방지하는 방법이 있다.¹³⁾ 다른 한 가지 방법은 Goldberger에 의해 개발된 것으로 교란항 ε 이 로그 정규분포를 한다면 간단한 방법으로 해결이 가능하다.¹⁴⁾ 이 두 가지 방법은 모두 나름대로 장단점이 있으나, 비선형회귀분석에서 나온 추정치는 회귀계수가 최량 선형불편추정량(BLUE)이 아니라는 단점이 있다. 본 연구는 가상배출권의 가격을 통하여 수질오염물질 저감의 경제적 가치를 측정하는 것이므로 추정량이 불편추정량이 아닐 수 있다면 문제가 될 수 있다. 따라서 비선형회귀분석 방법은 채택하지 않기로 한다.

로그선형모형의 OLS 추정량 자체는 최량 선형불편추정량(BLUE)이지만, 본래의 모형, 즉 콥-더글러스 형태의 함수에서의 절편항의 추정량은 불편추정량이 아니며 이러한 편익을 Goldberger가 제시한 방법론에 따라 처리하여 보자.

실증분석을 위한 순편익함수는 다음과 같다.

$$NB = \beta_0 E^{\beta_1} y^{\beta_2} \varepsilon \quad (8)$$

12) Arthur S. Goldberger, *Topics in Regression Analysis*, The Macmillan Company, New York, 1978, p.120

13) William H. Greene, *Econometric Analysis*, The Macmillan Company, New York, 1993, p.316 및 Judge et al.(1982) 참조.

14) Arthur S. Goldberger, "The Interpretation and Estimation of Cobb-Douglas Functions," *Econometrica*, Vol. 35, No. 3-4(July-October, 1968)

단, 여기서 ε 은 로그 정규분포(log-normal distribution) 를 따른다고 가정을 한다. 양변에 로그를 취하여 로그 선형모형으로 변형하면 다음과 같다.

$$\ln NB = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln E + \beta_2 \ln y + \ln \varepsilon \quad (9)$$

그런데 여기서 $E(\ln \varepsilon) \neq 0$ 이다.¹⁵⁾ 따라서 이 회귀식의 추정치들이 불편 추정량이라는 보장이 없다.

이제 이 편의를 제거하기 위하여 식 (9)의 우변에 $E(\ln \varepsilon)$ 을 더하고 빼어 변형시키면 다음과 같다.

$$\ln NB = \ln \beta_0 + E(\ln \varepsilon) + \beta_1 \ln E + \beta_2 \ln Y + \ln \varepsilon - E(\ln \varepsilon) \quad (10)$$

단, $E(\ln \varepsilon - E(\ln \varepsilon)) = 0$ 이다. 여기서, $\alpha = \ln \beta_0 + E(\ln \varepsilon)$ 으로, 그리고 $\varepsilon^* = \ln \varepsilon - E(\ln \varepsilon)$ 으로 놓으면 로그 선형함수 회귀식은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\ln NB = \alpha + \beta_1 \ln E + \beta_2 \ln Y + \varepsilon^* \quad (11)$$

여기서 $E(\varepsilon^*) = E(\ln \varepsilon - E(\ln \varepsilon)) = 0$ 이므로 $\alpha = \ln \beta_0 + E(\ln \varepsilon)$ 의 추정치는 불편 추정량이 된다. 또한 $\ln \varepsilon$ 과 ε^* 은 상수만큼 차이가 날 뿐이며 그 분산은 같다. 다시 말하자면, 콥-더글러스 함수의 양변에 로그를 취하여 회귀분석을 하여 추정되는 추정치들은 우리가 원하는 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 의 추정치가 아닌 α, β_1, β_2 의 추정치라는 것을 재 확인할 수 있다.

이제 우리의 관심사항인 β_0 의 추정에 관한 문제에 관하여 논의해 보자.

가장 단순한 방법으로서 만일(식 1)에서 교란항 ε 이 로그 정규분포를 보인다면 장애모수(nuisance parameter) $E(\ln \varepsilon)$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.¹⁶⁾

15) $E(\ln \varepsilon) < \ln E(\varepsilon) = \ln E(1) = 0$, 이러한 성질은 로그함수의 오목성으로 인한 것이다. <부도 1> 참조.

16) Goldberger(1968), p.123

$$E(\ln \varepsilon) = -\frac{1}{2} \text{var}(\ln \varepsilon) \quad (12)$$

로그를 취하여 추정을 함으로써 상수항을 조정함에 있어서, 로그 정규분포의 양의 왜도(skewness)로 인하여 중앙값이 평균값보다 작아지게 된다는 사실이 식 (12)로 반영되는 것이다. $\ln \varepsilon$ 의 분산은 회귀식 (9)에서 추정된 회귀식의 오차항을 제공하는 통상적인 방법으로 $E(\ln \varepsilon)$ 을 추정할 수 있다.

이제 추정된 $E(\ln \varepsilon)$ 의 값을 식 (19)에 대입하여 α 에 대한 추정치 a 를 구한다. 마지막으로 추정된 $E(\ln \varepsilon)$ 와 a 를 통해 다음과 같이 우리가 원하는 β_0 의 추정치를 구체적인 수치로 구할 수 있다.

$$a = \ln \beta_0 + E(\ln \varepsilon) \Rightarrow \ln \beta_0 = a - E(\ln \varepsilon)$$

$$\therefore \beta_0 = e^{a - E(\ln \varepsilon)} = \frac{e^a}{e^{E(\ln \varepsilon)}}$$

여기서 ε 은 로그 정규분포를 취하는 것으로 가정되어 있다. ε 의 기대치, 즉 로그 정규분포의 오차항의 기대치, 즉 $E(\ln \varepsilon)$ 는 $-\frac{\sigma^2}{2}$ 이므로, $\beta_0 = e^{a + \frac{\sigma^2}{2}}$ 이다. σ 는 회귀분석의 표준오차를 사용하여 계산하면 절편 β_0 값은 $\beta_0 = e^{10.9570 + \frac{2.1042^2}{2}} = 524,829.5$ 이다.

따라서 Goldberger 방법에 의하여 추정된 순편익방정식은

$$NB = 524,830 E^{0.90198} y^{0.5383117} \quad (13)$$

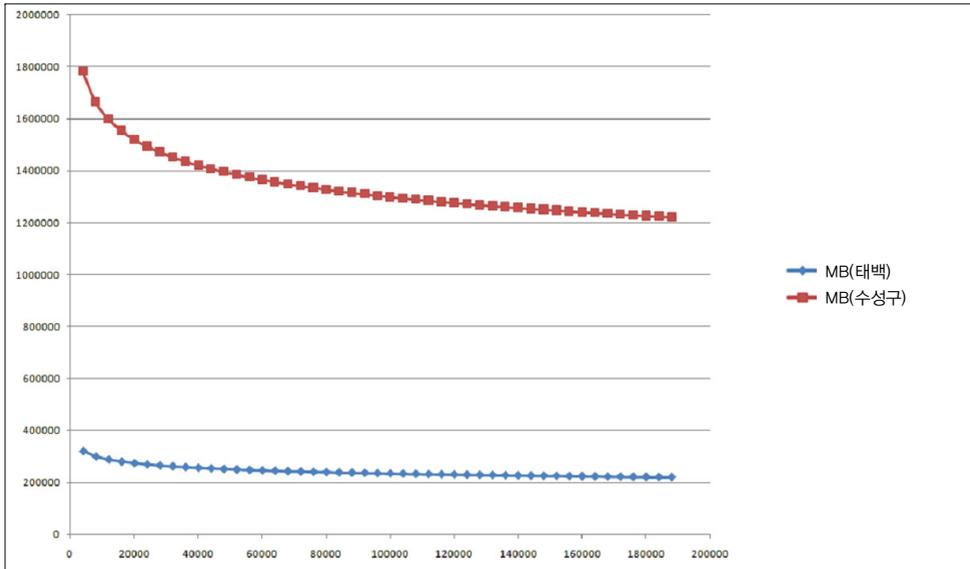
이를 배출량 E에 대하여 편미분하여 얻은 시군별 한계순편익함수는 다음과 같다.

17) 이 추정식에서 $\alpha + \beta > 1$ 로서 <부록 1>의 $0 < \alpha + \beta < 1$, 즉 규모체감의 가정을 위반한 것처럼 보일 수 있다. 그러나 이 조건은 배출량과 토지투입량의 함수로서의 편익을 규정한 수식이며, 위의 추정식은 토지가격과 배출량의 함수로서의 편익을 정의하고 있으므로 이 조건을 위배하지 않는다.

$$MNB_i = P_{E_i} = 473,386 E^{-0.09802} y^{0.53831} \quad (14)$$

한계편익함수를 이용하여 태백시와 수성구의 한계편익곡선을 나타낸 것이 <그림 3>이다.

<그림 3> 태백시와 수성구의 한계편익곡선¹⁸⁾



추정된 한계편익함수(14)로부터 역함수를 구하여 다음과 같은 배출저감 한계비용 (배출권 가격과 동일한 의미)의 함수인 배출량수요함수를 도출할 수 있다.

$$E = 1.205 \times 10^{58} y^{5.492} P_E^{-10.2} \quad (15)$$

이제 배출량 수요함수(15)에서 각 지자체에 할당된 배출권 할당량을 차감해주면 각 지자체별 배출권 초과수요함수(ED: Excess Demand Function)를 다음과 같이 정

18) 여기서 가로축은 오염물질 배출량(kg BOD/day), 세로축은 화폐단위 원을 나타낸다.

의할 수 있다.¹⁹⁾

$$ED = 1.205 \times 10^{58} y^{5.492} P_E^{-10.2} - \bar{E} \quad (16)$$

추정된 함수로부터의 배출권 시장 균형조건을 구하기 위하여 각 지자체별로 초과 수요 함수를 설정하고 다음과 같이 초과수요의 전체 합이 0이 되도록 하는 배출권의 가격을 구하면 바로 균형 배출권 가격이 도출된다.

$$\sum_{i=1}^n ED_i(P_E) = 0 \quad (17)$$

각 지자체별로 추정된 배출권 초과수요함수는 부록 <부표 2>와 같다.

추정된 균형 배출권 가격은 이들 지자체별 배출권 초과수요함수를 모두 합하여 0이 되도록 놓고 풀어주면 다음과 같이 계산된다.

$$P_E^* = 1,409.3$$

따라서 균형 배출권가격은 $P_E^* = 1,409.3$ 원 / kg BOD / year로 추정되었다.²⁰⁾

배출 총량제도에 합의된 배출량 단위당 경제적 가치를 가상 배출권 가격 모형의 실증분석을 통하여 추정한 결과는 1,409.3원/kgBOD/year이었다. 하수재처리 시설의 경우 하수재처리 시설을 통하여 오염물질의 배출농도가 일정한 수준으로 감소된다면, 연간 방류량에 이 농도를 곱하여 주면 연간 저감되는 오염물질의 배출량을 계산할 수 있다.

19) 각 지자체별 할당량은 <부표 1>에 나타나 있다.

20) 이는 수질 오염물질의 단위당 공학적 처리비용인 6,435원/kgBOD(문현주(2009)로부터 계산)과 비교하여 보면 낮은 금액이다. 그러나 배출권의 가격은 연간 이만한 양의 배출량을 저감할 때 발생하는 환경적 편익의 경제적 가치, 혹은 저감비용의 화폐적 크기를 말하는 것임에 반하여, 공학적 처리비용은 시간개념이 없이 주어진 BOD양에 대한 공학적 처리비용을 계산한 것이므로 둘을 직접 비교하기는 어렵다.

이러한 방식을 대구달성 산단의 하수재처리 사업에 적용하여 보자. 본 논문의 배출권 가격의 실증분석을 통하여 추정된 배출권가격은 33,229원/kgBOD이다. 대구달성 산단의 방류수의 수질 기준은 3mg/l 혹은 6.7mg/l이다. 하수재처리수 사업에 의하여 매일 11,500톤의 오염수 방류를 저감하면 이로부터 연간 12,592.5kgBOD (3mg/l 적용 시) 혹은 28,123kgBOD(6.8mg/l 적용 시)의 오염물질 배출이 감소된다.²¹⁾ 여기에 추정된 가상 BOD 배출권 가격(1,409원/kgBOD)을 곱하여 주면 그 편익은 연간 1,774.3만 원 내지 3,962.5만 원으로 계산된다. 이러한 편익이 향후 20년간 발생하는 것을 전제로 할인율 5.5%를 적용하면 현가기준으로 2억 2,111만 원 및 4억 9,382만 원 정도에 해당된다. 이 수치는 해당 사업의 총추정비용 현가인 약 127억 원의 약 1.74% 및 3.89%에 해당하는 금액이다.

Hernandez-Sancho et al.(2010)의 COD/BOD kg당 잠재가격 추정치는 0.1유로(약 150원) 이하²²⁾였고, 문현주(2009)의 우리나라 플랜트 BOD 저감비용 추정치는 kg당 약 6,000원 정도, 그리고 Field(1997)와, Hall/Howett(1999)의 Pamlico 사례에서의 배출권 가격 추정치는 kgBOD당 56달러였다. 이와 같은 몇 개의 선행 연구의 추정치를 참고하여 보면, 본 연구에서 추정된 BOD kg당 1,409원은 기존의 추정치의 범위에서 크게 벗어나지 않는 수치라고 할 수 있다. 본 연구에서 추정된 배출저감의 경제적 가치는 직접적인 공학적 처리뿐만이 아니라 모든 가능한 옵션을 포함한 기회비용 개념이므로 공학적 처리비용인 문현주(2009)의 수치보다 작게 나온 것은 자연스러운 결과라고 평가될 수 있을 것이다.

IV. 결론 및 시사점

본 논문은 수질 총량제에 따른 수질오염물질의 단위당가치를 가상적 배출권 시장을 상정하여 균형배출권 가격을 추정함으로써 계산해내었다. 물론 가상적 수질 배출권 가격은 우리나라 낙동강 수계관리위원회에서 결정한 배출총량에 합의된 수질 오염물질 배출량 저감의 경제적 가치를 구한 것이며, 수질오염물질 배출량 저감의

21) 한국환경공단(2010) 참조.

22) Hernández-Sancho et al.(2010).

고유한 가치를 구한 것은 아니다. 그렇지만 이러한 방법론을 확장하면 배출권거래가 없지만 배출의 총량에 영향을 주는 많은 정책들에 대하여 배출의 단위당 가치를 계산해내는 것이 가능하다.

CVM 등의 방법론이 최종적이고 구체적인 환경적 가치, 즉 오염물질 배출(배출량)에 따른 수문학적, 화학적, 생태적 변화의 최종적 귀결인 수질(농도), 생태계 변화, 경관 등이 최종적인 시민(환경의 소비자)에게 주는 가치를 화폐적으로 추정해내는 것에 관심을 두고 있는 반면에 본 방법론은 프로젝트들로 인한 수질오염물질 배출저감량의 경제적 가치를 계산해주는 것이다. CVM 기법을 적용하면 수질오염물질 배출량의 변화의 가치평가가 아니라 이를 통한 최종적 환경질의 변화를 측정하는 것일 뿐 아니라 여기에는 통제되지 못한 여타 변수들의 결과가 혼재되어 있을 개연성이 높다. 본 논문에서 추정된 오염물질 배출의 단위당 가치에 배출량을 곱하면 수질오염물질 배출에 영향을 주는 정책과 프로젝트의 환경적 가치를 이해하기 쉽고 간명하게 평가할 수 있다. 이를 확장하면 수질배출 부과금율의 적용을 위한 요율의 결정에도 이 방법론을 적용할 수 있을 것이다.

물론 본 논문은 데이터의 제약 등으로 많은 한계를 지니고 있다. 그리고 본 논문의 모형의 함수형태에서 편익창출활동(개발사업)의 축소를 통한 수질오염물질 배출저감과 배출저감기술투자에 의한 수질오염물질 배출 저감을 명시적으로 구분하지 않고 포괄적으로 처리한 것도 한계로 지적될 수 있다. 또한 산출물거리함수를 이용한 가치추정 등과의 이론적 실증적인 보다 면밀한 비교분석도 향후 연구에서 해결되어야 할 과제이다.

[References]

1. 김홍배·김영민, “수질오염물질 배출권거래제 도입이 지역 경제에 미치는 영향 분석,” 『국토계획』 46, 대한국토도시계획학회, 2011.04.
2. 낙동강수계관리위원회, 「낙동강수계 오염총량관리 기본계획」, 2005.
3. 문현주, 「수질오염총량관리를 위한 배출권거래제 적용방안 연구」, 한국환경정책평가

- 연구원, 2009.
4. 신영철, “이중양분선택형 질문 CVM을 이용한 한강수질개선 편익 측정,” 「환경경제 연구」, Vol. 6, No. 1, 1997, pp. 171~192.
 5. 환경관리공단, 「하수처리수의 공업용수 재이용사업 예비타당성 및 민자 적격성 조사 연구」, 2008.
 6. 한국환경공단, 「하수처리수의 공업용수 재이용사업 비용편익 분석기준 연구」, 2010.5.
 7. 환경부, 「08년도 공공하수처리시설 운영관리 실태 분석 결과」, 2009.9.
 8. 환경부, 「2008 상수도 통계」, 2009.
 9. Farrow, R. S, M. T. Shultz, P. Celikkol, G. L. Van Houtven, Pollution Trading in Water Quality Limited Areas: Use of Benefits Assessment and Cost-Effective Trading Ratios, *Land Economics*, Vol. 81, No. 2, 2005, pp. 191~205.
 10. Field, Barry C., *Environmental Economics: An Introduction*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1997.
 11. Goldberger, Arthur S. a, *Topics in Regression Analysis*, The MacMillan Company, 1968.
 12. Goldberger, Arthur S. b, “On the Interpretation and Estimation of Cobb-Douglas Functions,” *Econometrica*, Vol. 36, July-October 1968.
 13. Gujarati, Damodar and Dawn C. Porter(박완규·홍성표 역) *Basic Econometrics* 「계량 경제학」, 맥그로힐 코리아, 2009.
 14. Greene, William H., *Econometric Analysis*, The Macmillan Company, New York, 1993, p. 316.
 15. Hall, J. C. and C. M. Howett, “Guide to establishing a point/nonpoint source pollution reduction trading system for basin wide water quality management: The Tar-Pamlico River Basin experience,” EPA-904-95-900. North Carolina Department of Environment, Health, and Natural Resources, 1995.
 16. Hernández-Sancho, Francesca, María Molinos-Senante, and Ramón Sala-Garrido, “Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain,” *Science of the Environment* 308, 2010, pp. 953~957, Elsevier.
 17. Hung, Ming-Feng and Daigee Shaw, A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits, *J. of Env. Economics & Mgmt.*, Vol. 49, 2005, pp. 83~

102.

18. Judge et al., *Introduction to the Theory and Practice of Econometrics*, John Wiley & Sons, Inc., 1982.
19. Muller, N. Z. and R. Mendelsohn, Efficient Pollution Regulation: Getting the Prices Right. *American Economic Review*, Vol. 99, No. 5, 2009, pp. 1714~1739.
20. Rolfe, John and Jill Windle, Using auction mechanisms to reveal costs for water quality improvements in Great Barrier Reef catchments in Australia, *Agricultural Water Management* 98, 2011, pp. 493~501.
21. U.S. EPA, “Water quality trading assessment handbook: Can water quality trading advance your watershed’s goal?” U.S. EPA Office of Water, Washington DC: EPA, 2004.
22. Woodward, R. T., R. A. Kaiser, and A. M. Wicks, The structure and practice of water quality trading markets. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002.

[Appendice]

〈부록 1〉 배출 순편익함수의 유도

개별 개발 프로젝트의 편익이 자본스톡(K_i)과 오염물질 배출(E_i)의 두 가지 요소의 함수라고 가정하자.²³⁾

$$B = f(K, E) \tag{A1}$$

순편익은 콥-더글러스형태로 표현되는 편익함수에서 자본비용(mK)과 배출비용(cE)을 뺀 것이라고 설정하자. 여기서 $m > 0$ 및 $c > 0$ 이다. 편익은 배출편익시설별 자본 K 와 배출량 E 의 함수로서 콥-더글러스 함수 형태를 갖는다고 가정한다. 비용은 자본 총가액의 일정비율과 배출비용²⁴⁾의 선형함수의 합으로 가정한다.

배출시설의 순편익함수를 다음과 같이 설정한다.

$$NB = pk(K)^\alpha E^\beta - mK - cE \tag{A2}$$

단, p 는 산출물의 가격이며($p > 0$), k 는 편익함수의 기술 파라미터이며($k > 0$), α 와 β 는 각각 투입요소로서의 자본가액과 배출량의 콥-더글러스 파라미터이다. 단, 여기서 α 와 β 의 합이 0보다 크고 1보다 작다고, 즉 편익함수에 규모에 대한 수익 체감을 가정한다. 이 순편익함수를 추정하는 데에 문제점은 자본스톡의 데이터가 존재하지 않는다는 것이다. 따라서 토지가액을 바탕으로 자본스톡의 대리변수를 구성한다. 여기서, $K = sy$, 즉 자본스톡은 단위면적당 GRDP(y)에 토지면적 s ($s > 0$)

23) 개발 시설에서 생산되는 생산물 혹은 사회적 편익은 자본과 노동의 투입에 의하여 생산되는데, 자본 투입 데이터가 없으므로 토지투입량과 지가를 곱하여 이를 자본투입에 대한 대리변수로 사용하였다. 실제로 많은 시성에 있어서 가장 중요한 투입물은 토지인 경우가 많으며 여타 자본투입의 가치가 토지가액에 개략적으로 비례한다고 가정하여도 큰 무리는 없을 것이다.

24) 배출비용 cE 는 순수하게 사적인 환경비용이다. 외부성을 가져오는 환경비용은 개별 시설의 의사결정에서는 고려되지 않는다. 수질오염의 피해비용은 수계의 배출총량을 결정할 때에 고려되어서 최적의 수질을 가져오는 배출총량 상한과 시군별 배출상한이 결정될 때에 고려되는 것이며, 각 시군의 배출시설의 배출량은 순수하게 경제적인 순편익만을 고려하여 순편익을 극대화하는 수준에서 결정된다.

를 곱한 값이라고 하자. 그리고 $A = pks^\alpha$ 라고 하자.

이제 순편익함수를 극대화하는 문제를 풀면 그 1계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial NB}{\partial y} = Ay^{\alpha-1}E^\beta - ms = 0 \quad (A3)$$

$$\frac{\partial NB}{\partial E} = Ay^\alpha E^{\beta-1} - c = 0 \quad (A4)$$

식 (A3)과 (A4)를 y 에 대해 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$y = \frac{c}{ms} E \quad (A5)$$

식 (A5)를 순편익함수 식 (A2)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$NB = pk \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^\alpha \left(\frac{c}{ms^2} \right)^\alpha E^{(\alpha+\beta)} - \left(\frac{\alpha+\beta}{\beta} \right) \frac{c}{ms} E \quad (A6)$$

여기서 $\frac{c}{s}$ 는 배출시설의 단위면적당 배출비용 계수로서 배출량 단위당 환경피해의 금전적 가치를 나타내는 계수로서 모든 배출시설에 적용되는 상수라고 가정할 수 있다. 즉, NB 는 오로지 배출량 E 의 함수로 나타낼 수 있다.

순편익함수를 미분하여 한계순편익 함수를 얻을 수 있다.

$$MNB = \frac{\partial NB}{\partial E} = pk(\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^\alpha \left(\frac{c}{ms^2} \right)^\alpha E^{(\alpha+\beta)-1} - \left(\frac{\alpha+\beta}{\alpha} \right) \frac{c}{ms} \quad (A7)$$

한계순편익함수를 미분하고 그 부호를 결정하면 다음과 같이 부호가 음임을 알 수 있다.

$$\frac{\partial MNB}{\partial E} = pk(\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^\alpha \left(\frac{c}{ms^2}\right)^\alpha (\alpha + \beta - 1) E^{(\alpha + \beta) - 2} < 0 \quad (A8)$$

여기서 부호가 음인 것은 파라미터 값이 $0 < (\alpha + \beta) < 1$ 의 조건을 충족하는 것으로 전제되었기 때문이다.

한계순편익함수는 오염배출 부하량과 마이너스의 관계를 갖는다. 즉, 한계순편익곡선은 배출량에 대하여 음의 기울기를 가지며 우하향하는 수요곡선의 모양을 갖는다. 단 이는 파라미터 $(\alpha + \beta)$ 의 합이 1보다 작은 경우에만 성립하며 그러한 조건이 충족되는지는 실증적인 데이터 분석에 달려 있다. 한편 한계순편익은 곧 오염배출에 대한 잠재한계가격을 나타내므로 배출량과 잠재한계가격이 마이너스의 관계를 갖게 된다.

한편 순편익함수의 식 (7)에서 비용 부분인 $\frac{c}{ms}E$ 를 편익에서 차감하는 대신 편익에 1보다 작은 수를 곱해주는 방식으로 전환하는 것이 또한 가능하다. 이 경우 순편익함수는 다음과 같이 변형된다.

$$NB = AE^\delta y^\eta \nu^E, \text{ 단 } 0 < \nu < 1$$

여기서 $\nu^E = kE^\lambda$ 라고 가정하면,

$$NB = AE^\delta y^\eta kE^\lambda = AkE^{\delta + \lambda} y^\eta \quad (A9)$$

$a = Ak$ 라 하고 $\tau = \delta + \lambda$ 라 하면 이는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$NB = aE^\tau y^\eta$$

양변에 로그를 취하면 다음 식이 유도된다.

$$\ln NB = \ln a + \tau \ln E + \eta \ln y \quad (A10)$$

〈부록 표 1〉 실증분석에 사용된 데이터 (2010년 기준)

구분	개발면적(m ²)	배출량(kg/일)	평균지가(원/m ²)	총할당량	GRDP (2007) (단위: 십억)
태백	47,177,353	1,053	17,685	3,555	671
경산시	6,594,607	808	44,267	18,377	3528.9
경주시 산내면	42,188		20,996	676	4763.4
고령군	29,311,985	2,047	7,797	7,996	713.8
구미시	10,708,575	1,778	40,428	14,361	17170.2
군위	2,023,964	115	3,706	5,195	383.2
김천시	11,289,355	297	12,230	18,494	2040.3
문경시	45,909,540	343	8,646	8,490	934
봉화군	9,269,689	824	1,758	6,565	492.9
상주시	367,198	203	5,886	14,517	1142.6
성주군	8,000,007	309	6,111	6,149	760.9
안동시	3,807,133	217	7,007	12,887	1830.3
영양군	2,359,669	23	2,104	2,857	299.2
영주시	5,096,570	847	10,088	13,265	1489.5
영천시	5,326,843	377	7,426	10,029	1711.4
예천군	84,157,911	598	3,015	7,700	691
울진군	5,236		8,554	87	1828.8
의성군	610,039	56	2,989	8,815	709.3
청도군	1,986,564	86	4,117	5,105	631.5
청송군	2,627,869	257	1,885	3,568	453
칠곡군	5,706,905	707	21,067	9,318	1772.1
포항시 북구			36,355	409	13478.1
남구	184,229	20	406,147	1,159	1491.385
달서구	592,815	70	432,978	6,199	7126.862
달성군	28,849,444	1,543	55,761	11,185	2588.096
대구광역시	231,878	48	212,040		27928.39
동구	1,477,092	190	188,063	2,334	2849.824
북구	424,844	47	218,535	4,875	4784.854
서구	186,790	2	506,436	5,275	2236.646
수성구	1,310,041	106	381,613	4,482	4062.535
중구	28,066	145	1,620,368	918	2788.187
거창군	15,226,561	862	4,058	7,002	854.06

〈부록 표 1〉 실증분석에 사용된 데이터 (2010년 기준) (계속)

구분	개발면적(m ²)	배출량(kg/일)	평균지가(원/m ²)	총할당량	GRDP (2007) (단위: 십억)
김해시	15,313,427	2,252	66,901	17,786	7425.5
마산시	187,660	46	73,309	917	4944.737
밀양시	30,294,247	1,980	13,234	10,655	1750.195
사천시	198,706	14	20,665	364	2153.403
산청군	11,253,327	107	3,078	6,952	526.88
양산시	12,412,929	1,985	50,343	12,425	4855.445
의령군	20,951,943	1,254	3,346	6,014	471.348
진주시	5,527,553	1,292	25,828	11,918	3963.979
창녕군	10,837,982	347	9,940	7,206	990.866
창원시	6,169,946	711	192,613	2,611	14497.177
하동군	1,320,000	6	5,379	640	1132.603
함안군	10,129,898	828	12,814	8,885	1579.765
함양군	52,371,559	1,515	3,781	8,435	548.449
합천군	33,385,349	2,093	2,933	11,156	718.31
울주군	1,827,383	12	29,110	138	6808.925472
남원시	4,181,867	10	7,020	2,786	8.917728459

자료: 낙동강 수계관리위원회(2005), 통계청 KOSIS, 국토해양부 내부자료 등

〈부록 표 2〉 지자체별 배출권 초과수요

지자체 명	배출권 초과 수요함수
태백	$ED = 4.00552E+27 \times PE^{-7.14} - 1297575$
경산시	$ED = 2.36614E+28 \times PE^{-7.14} - 6707605$
경주시 산내면	$ED = 3.26165E+28 \times PE^{-7.14} - 246740$
고령군	$ED = 4.2795E+27 \times PE^{-7.14} - 2918540$
구미시	$ED = 1.2861E+29 \times PE^{-7.14} - 5241765$
군위	$ED = 2.19954E+27 \times PE^{-7.14} - 1896175$
김천시	$ED = 1.31655E+28 \times PE^{-7.14} - 6750310$
문경시	$ED = 5.70607E+27 \times PE^{-7.14} - 3098850$
봉화군	$ED = 2.8795E+27 \times PE^{-7.14} - 2396225$
상주시	$ED = 7.07966E+27 \times PE^{-7.14} - 5298705$
성주군	$ED = 4.58233E+27 \times PE^{-7.14} - 2244385$
안동시	$ED = 1.1721E+28 \times PE^{-7.14} - 4703755$
영양군	$ED = 1.68789E+27 \times PE^{-7.14} - 1042805$
영주시	$ED = 9.40198E+27 \times PE^{-7.14} - 4841725$
영천시	$ED = 1.09082E+28 \times PE^{-7.14} - 3660585$
예천군	$ED = 4.1334E+27 \times PE^{-7.14} - 2810500$
울진군	$ED = 1.17107E+28 \times PE^{-7.14} - 31755$
의성군	$ED = 4.25064E+27 \times PE^{-7.14} - 3217475$
청도군	$ED = 3.75375E+27 \times PE^{-7.14} - 1863325$
청송군	$ED = 2.63082E+27 \times PE^{-7.14} - 1302320$
칠곡군	$ED = 1.13227E+28 \times PE^{-7.14} - 3401070$
포항시 북구	$ED = 9.92587E+28 \times PE^{-7.14} - 149285$
남구	$ED = 9.41471E+27 \times PE^{-7.14} - 423035$
달서구	$ED = 5.01958E+28 \times PE^{-7.14} - 2262635$
달성군	$ED = 1.69807E+28 \times PE^{-7.14} - 4082525$
대구광역시	$ED = 2.16439E+29 \times PE^{-7.14} - 0$
동구	$ED = 1.88244E+28 \times PE^{-7.14} - 851910$
북구	$ED = 3.27737E+28 \times PE^{-7.14} - 1779375$
서구	$ED = 1.45256E+28 \times PE^{-7.14} - 1925375$
수성구	$ED = 2.75093E+28 \times PE^{-7.14} - 1635930$
중구	$ED = 1.83891E+28 \times PE^{-7.14} - 335070$

〈부록 표 2〉 지자체별 배출권 초과수요 (계속)

지자체 명	배출권 초과 수요함수
거창군	$ED = 5.18512E+27 \times PE^{-7.14} - 2555730$
김해시	$ED = 5.24496E+28 \times PE^{-7.14} - 6491890$
마산시	$ED = 3.39468E+28 \times PE^{-7.14} - 334705$
밀양시	$ED = 1.1173E+28 \times PE^{-7.14} - 3889075$
사천시	$ED = 1.39479E+28 \times PE^{-7.14} - 132860$
산청군	$ED = 3.09241E+27 \times PE^{-7.14} - 2537480$
양산시	$ED = 3.32913E+28 \times PE^{-7.14} - 4535125$
의령군	$ED = 2.74499E+27 \times PE^{-7.14} - 2195110$
진주시	$ED = 2.67958E+28 \times PE^{-7.14} - 4350070$
창녕군	$ED = 6.07858E+27 \times PE^{-7.14} - 2630190$
창원시	$ED = 1.0731E+29 \times PE^{-7.14} - 953015$
하동군	$ED = 7.01341E+27 \times PE^{-7.14} - 233600$
함안군	$ED = 1.00129E+28 \times PE^{-7.14} - 3243025$
함양군	$ED = 3.22806E+27 \times PE^{-7.14} - 3078775$
합천군	$ED = 4.30844E+27 \times PE^{-7.14} - 4071940$
울주군	$ED = 4.78035E+28 \times PE^{-7.14} - 50370$
남원시	$ED = 3.93403E+25 \times PE^{-7.14} - 1016890$

〈부록 그림 1〉 로그함수의 오목성

