# 압전에너지 하베스터 설치사업의 경제성 분석에 관한 연구*

이현경** · 이민기*** · 김홍배****

# A Cost-Benefit Analysis for the Installation of Piezoelectric Energy Harvester*

Lee, Hyun-Kyung**, Lee, Min-Gi***, Kim, Hong-Bae****

**국문요약** 본 연구에서는 경부고속도로 일부구간(신갈JC~수원신갈IC)에 압전에너지 하베스터를 설치한 후 수확된 전력으로 주거지의 가로등 전력을 대체하는 정책에 대한 비용편익분석을 실시하였다. 이때 비시장재효과인 하베스터 설치에 따른 주민의 사회적 편익은 구체적으로 지역 주민의 삶의 질 향상 효과, Blackout 대비효과 등을 포함하며 조건부가치측정법을 사용하여 추정하였다. 분석 결과 압전 에너지하베스팅 기술의 고속도로 적용은 사회적 편익효과를 고려하였을 때 경제성이 있는 것으로 나타났다.

**주제어** 압전에너지 하베스터, 에너지 하베스팅, 비용편익분석, 조건부가치측정법

**Abstract** : The piezoelectric energy harvester is recently being developed and catching on as a way to achieve low carbon green growth. The practical application of the piezoelectric energy harvester is expected to contribute not only to the reduction of greenhouse gas emissions but also to the improvement of residents' welfare. This paper conducted a cost-benefit analysis for the installation of piezoelectric energy harvester on the highway focusing on its impacts on the public. The results showed that the installation of piezoelectric energy harvester on the gyeong-bu highway is economically feasible in that it could increase the social welfare for the residents. Finally, this paper suggests policy direction for the practical use of the piezoelectric energy harvester, based on the results obtained.

**Key Words** : Piezoelectric energy harvester, Energy harvesting, Cost-Benefit analysis, Contingent Valuation Method(CVM)

---

* 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20142020103970)

** 한양대학교 도시공학과 석박사통합과정(주저자: lhk29@nate.com)

*** 한양대학교 도시공학과 박사과정(공동저자: 6257alsrl@naver.com)

**** 한양대학교 도시공학과 정교수(교신저자: hokim@hanyang.ac.kr)

## 1. 연구의 배경 및 목적

우리나라의 차량등록대수는 해마다 증가하고 있으며 차량의 증가는 혼잡과 소음 및 온실가스 배출 등과 같은 도시문제를 야기한다. 특히 2015년 기준 국내 온실가스 배출량의 약 13.2%가 차량통행에서 배출됨에 따라 차량은 주요 온실가스 배출원으로 인식되고 있다(교통안전공단, 2016). 정부가 도로 온실가스 배출을 줄이기 위하여 전환교통, 혼잡통행료부과 등 교통정책을 실시하고 있음에도 도로 교통량은 계속 증가하는 추세를 보이고 있다.

최근 차량의 물리적 압력을 새로운 전력원으로 보는 압전에너지 하베스팅 기술이 개발되고 있다. 구체적으로 이 기술은 압전에너지 하베스터를 도로에 매설하여 차량의 압력을 전력으로 전환하고 수집된 전력으로 기존전력을 대체하는 기술을 의미한다. 압전에너지 하베스팅 기술은 다른 신재생에너지에 비하여 수집된 전력의 양은 적지만 기존에 버려지는 차량의 운동에너지를 활용한다는 점에서 의의가 있다. 실제로 압전에너지 하베스터를 설치하면 전력 대체에 따른 온실가스 감축효과가 발생한다. 뿐만 아니라 생산된 전력을 지역 커뮤니티에서 활용함에 따라 주민의 삶의 질 향상에도 기여할 것으로 전망된다.

압전에너지 하베스팅 기술이 실제로 도시에 적용되기 위해서는 가장 기본적으로 경제적 타당성을 확보해야 한다. 왜냐하면 아무리 기술이 우수하더라도 기술이 실용화되었을 때 사회복지향상이 없다면 그것은 진정한 공공정책으로써의 의미를 갖지 못하기 때문이다(Lee · Kim, 2016). 또한 압전에너지 하베스팅 기술로 수집된 전력의 양이 상대적으로 적기 때문에 기술이 실용화되기 위해서는 경제성과 효율성이 반드시 뒷받침되어야 한다(이덕희, 2011). 그러나 문헌을 살펴보면 압전에너지 하베스팅 기술의 경제적 타당성과 그 효과에 대한 논의는 아직 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 논문은 압전에너지 하베스팅 기술의 도시적용을 위한 기초 연구로써 기술의 사회적 편익효과에 초점을 맞추어 압전에너지 하베스터 설치사업의 경제성을 분석하고자 한다.

본 논문의 구조는 크게 5절로 구성된다. 2절에서는 에너지 하베스팅 기술 효과에 대한 선행연구를 검토하여 본 연구의 차별성을 도출한다. 3절에서는 압전에너지 하베스터 설치사업을 구체적으로 정의하고 정책의 비용과 편익을 항목화한 후 각 항목에 대한 가치화 방법을 제시한다. 4절에서는 비용 · 편익 항목을 가치화하여 사업의 비용편익분석을 실시하고 분석결과를 도출한다. 마지막 5절에서는 분석 결과를 바탕으로 정책의 시사점 및 향후 연구방향을 제시한다.

## 2. 선행연구 검토

### 1) 에너지 하베스팅 기술의 효과

에너지 하베스팅이란 빛, 열, 진동 등 우리 주변에 흔히 존재하지만 기존에 사용되지 않았던 에너지원을 전기에너지로 변환하여 활용하는 것을 말한다(유병곤, 2008). 에너지 하베스팅 기술의 효과는 크게 전력생산효과와 전력활용효과로 나눌 수 있다. 전력생산효과란 전력 활용처에 관계없이 전력이 생산됨으로써 얻어지는 효과를 의미하며 신에너지 생산효과와 온실가스 저감효과로 구분된다. 전자는 기존의 버려졌던 일상의 외력을 에너지원으로 하여 새롭게 전력을 획득함으로써 나타나는 효과를, 후자는 기존 에너지가 친환경 에너지로 대체됨으로써 나타나는 효과를 의미한다(박지영 · 김효진, 2014).

전력활용효과는 수확되는 전력을 활용함에 따라 나타나는 사회효과로써 기술의 적용방안에 따라 그 효과의 크기 및 수혜주체가 달라진다. 그렇기 때문에 에너지 하베스팅의 경제성 확보를 위해서는 수확된 전기에너지의 적절한 활용처를 찾는 것이 중요하다. 왜냐하면 에너지 하베스팅 기술로 생산되는 전력의 양이 적기 때문에 전력생산효과보다는 활용효과에 따라 경제성이 결정되기 때문이다(이덕희, 2011). 도로에서 에너지 하베스팅 기술로 수확된 전력의 활용방안은 크게 도로 시설물 전력으로 활용하는 방안과 도로 주변 주거 및 공공시설에 공급하는 방안으로 나눌 수 있다(이동민 외, 2009).

먼저 도로 시설물 전력으로 활용하는 방안은 생산된 전력으로 도로시설에서 필요한 전력을 공급하는 것이다. 터널시설, 조명시설, 교통정보 수집 및 제공시설 등과 같은 도로 시설물은 상시적인 가동을 위한 배터리를 필요로 하며 주기적인 배터리 교체가 요구된다. 에너지 하베스팅으로 수확된 전기를 활용하면 반영구적인 시스템 가동이 가능해짐에 따라 배터리 교체 비용 등 유지관리비용이 절감된다(박지영 · 김효진, 2014). 또한 Blackout과 같이 전원공급이 원활하지 못할 때에 발생할 수 있는 교통혼잡, 교통사고, 복구비용 등과 같은 대규모 사회적 비용 역시 절감할 수 있다(권용훈 외, 2009).

다음으로 생산된 전력을 도로주변 주거 및 공공시설에 공급하는 방안은 에너지 하베스팅 기술 적용에 따른 주민편익을 극대화하고, 도로 소음, 환경공해 등에 대한 민원발생 완화효과를 기대할 수 있다(이동민 외, 2009). 이때 활용처는 전력 생산량을 고려하여 정해지며 구체적으로 인근 주거지, 상업시설, 가로등과 같은 도시시설물 등이 있다. 특히 도로 인근 산간 벽오지 등의 낙후지역에 필요한 전력을 공급하게 되면 주민 불편해소 효과가 더 클 것으로 예상된다(이동민 외, 2009). 뿐만 아니라 도로 시설물 전력으로 활용하는 방안과 마찬가지로 전력의 상시 공급이 가능해짐으로써 Blackout시 발생할 수 있는 사회적 비용 발생을 사전에 예방함으로써 사회적 안정을 도모할 수 있다.

## 2) 에너지 하베스팅 기술의 효과분석

에너지 하베스팅 기술의 효과를 조건부가치측정법(CVM)이나 토빗모형을 사용하여 정량적으로 추정한 연구들은 다음 〈표 1〉과 같다. 대부분의 연구는 신재생에너지 사용에 대한 사회적 수용성을 정량화하기 위한 연구로써 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위한 지불의사금액을 도출하였다.

이창훈(2005)은 신재생에너지로 생산된 전력을 기존전력보다 높은 금액에 구매하는 녹색가격제도 도입을 모색하기 위해 가구당 지불의사금액을 도출하였다. 연구 결과 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위해 가구당 월평균 1,610원의 전기요금을 추가로 지불할 의사가 있는 것으로 판단되었다. 한편 녹색가격제도를 동의하는 응답자만을 대상으로 지불의사금액을 구하면 월평균 5,350원인 것으로 추정되었다.

임소영 · 허은녕(2008)은 신재생에너지 분야 전문가들의 신재생에너지에 대한 인식을 정량화하기 위하여 신재생에너지로 생산된 전력 사용을 위한 추가 전기요금인상분을 조건부가치측정법(CVM)으로 추정하였다. 분석결과 전문가들은 가구당 월평균 2,605원의 추가 전기요금을 지불할 의사를 보였다.

〈표 1〉 에너지 하베스팅 기술의 효과를 분석한 선행연구

| 구분 | 목적 | 방법 | 항목 | 결과 |
|---|---|---|---|---|
| 이창훈(2005) | 녹색가격제도의 국내도입방안을 모색 | 토빗 모형 | 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위한 지불의사금액(전기요금 인상) | 월평균 1,610원/가구. 월평균 5,350원/가구 (녹색가격제도에 동의하는 응답자만 대상) |
| 임소영 & 허은녕 (2008) | 신 · 재생에너지 분야 전문가들의 신 · 재생에너지에 대한 인식을 정량화 | CVM | 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위한 지불의사금액(전기요금 인상) | 월평균 2,605원/가구 |
| Li et al.(2008) | 화석연료를 대체하기 위한 신재생 에너지 연구개발의 중요성을 파악 | CVM | 화석연료에 의존하지 않는 신재생에너지의 연구개발을 위한 지불의사금액(전기요금 인상) | WTP 중앙값 $137/년/가구 |
| 이철용(2014) | 국내 신재생에너지에 대한 사회적 수용성 수준을 파악 | CVM | 원자력(화력) 발전 대신 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위한 지불의사금액 (전기요금 인상) | 원자력 발전: 월평균 4,554원/가구, 화력 발전: 월평균 4,005원/가구 |

Li et al.(2008)은 미국내 화석연료를 대체하기 위한 신재생에너지 연구개발의 중요성을 조건부가치측정법을 이용하여 정량화하였다. 분석결과 전기요금 인상분이 신재생에너지 연구개발 투자에 사용될 때 가구당 연 137$를 추가 지불할 의사가 있는 것으로 나타났다.

이철용(2014)은 국내 신재생에너지에 대한 사회적 수용성 수준을 조건부가치측정법을 이용하여 정량화하였다. 분석결과 원자력 발전 대신 신재생에너지로 생산된 전력을 사용하기 위해 가구당 월평균 4,554원의 전기요금을 추가로 지불할 의사가 있는 것으로 추정되었다. 신재생에너지를 통한 화력 발전 대체의 경우 가구당 월평균 4,005원의 전기요금을 추가로 지불할 의사가 있는 것으로 나타났다.

### 3) 소결

기존의 에너지 하베스팅 기술 효과를 분석한 연구는 다음과 같은 한계가 있다.

첫째, 기존 연구는 에너지 하베스팅 기술의 전력생산효과에만 초점을 맞추어 전력활용방안과 그에 따른 활용효과를 함께 고려하지 못했다. 에너지 하베스팅 기술은 그 전력활용방안에 따라 사회적 편익효과가 달라지기 때문에 에너지 하베스팅 전력활용방안과 그 효과를 반드시 구체화하여 고려해야 한다.

둘째, 기존 연구는 분석대상이 신재생에너지로 한정되어 진행되었다. 신재생에너지는 주변 환경 속의 에너지를 이용한다는 측면에서는 에너지 하베스팅과 같은 범주라고 할 수 있다. 그러나 김효진 외(2014)가 지적하였듯이 에너지 하베스팅은 발전성능과 발전목적에 있어 신재생에너지와는 차이가 존재한다. 즉, 신재생에너지는 대규모 발전이 가능하며 기존전력 대체가 목적인 반면 에너지 하베스팅은 소규모 발전으로 기존전력 대체보다는 전력 활용에 따른 사회적 효과를 거두는 데 그 목적이 있다. 따라서 엄밀히 말해 기존 연구 중 에너지 하베스팅 기술의 경제성 분석을 수행한 연구는 아직 이루어지지 않았다고 할 수 있다.

요약하면 본 연구에서는 압전에너지 하베스팅 기술의 경제성을 평가한다는 측면에서 기존연구와 차별성을 가진다. 또한 기술의 전력생산효과뿐만 아니라 지역 커뮤니티 차원의 전력활용효과를 함께 고려하여 효과를 구체화하였다는 점에서도 기존연구와 차별성을 가진다.

## 3. 분석의 틀

본 논문은 비용편익분석의 대상이 되는 정책을 고속도로 1차선 1km 구간에 압전 에너지하베스터를 매설하고 수확된 전력을 고속도로 인근 주거지역 내 공공안전을 위해 공급하는 것으로 정의한다. 구체적인 활용방안은 수확된 전력의 양을 고려하여 해당전력으로 고속도로 인근 주거단지 가로등 점등에 필요한 전력을 대체하는 것으로 한정한다. 설치 대상지는 기존 고속도로 구간 중 고속도로 교통량, 주거단지와의 거리, 해당 행정동 인구 및 전력사용량을 표준점수화한 후 가장 점수가 높은 경부고속도로의 신갈JC~수원신갈IC구간(경기도 용인시)으로 선정하였다.

압전에너지 하베스터 설치사업에 대한 경제성 평가는 기본적으로 설치사업과 무투자 대안의 비교를 통해 이루어진다. 이때 무투자 대안이란 사업 자체를 집행하지 않는 대안을 의미한다. 만일 압전에너지 하베스터 설치사업의 경제성이 무투자대안의 경제성보다 크다면 이 사업은 사회적 의미가 있는 정책사업이므로 시행되어야 할 것이다. 본 논문에서는 정책의 경제성을 평가하는 지표로써 편익−비용비(B/C)와 순현재가치(NPV)를 이용하기로 한다. 정책의 선택은 정책의 경제성 분석결과가 다음과 같을 경우에 해당된다.

- 편익−비용비 〉 1 ($B/C > 1$)
- 순현재가치 〉 0 ($NPV > 0$)

사업 효과의 공간적 범위는 하베스터 설치로 직접적인 사회적 영향을 받는 범위, 즉 수확된 전력이 공급되는 대상지 인근의 지역으로 한정한다. 시간적 범위는 압전 에너지 하베스터의 생애주기를 고려하여 2016년~2035년, 총 20년으로 한정한다. 사회적 할

인율은 한국개발연구원(2008)에서 제시한 5.5%를 사회적 할인율로 적용하기로 한다. 사업의 효과를 측정하기에 앞서 사업의 효과를 항목화하고 각 항목의 계량분석 범위가 결정되어야 한다. 먼저 압전에너지 하베스터 설치로 인해 발생하는 효과들을 비용과 편익의 항목으로 구분하면 〈표 2〉와 같다. 하베스터 설치에 있어 비용항목은 하베스터의 제작비용, 설치비용 그리고 하베스터의 유지 · 보수 · 관리비용이 있다. 이 밖에 하베스터 설치 공사로 인해 발생하는 교통혼잡, 소음 및 진동 발생 등도 주민들에게 전가되는 비용 항목이다.

압전에너지 하베스터 설치로부터 발생되는 편익은 기본적으로 전력 수확량으로부터 기인한다. 수확된 신에너지로 기존 전력을 대체하게 되면 기존전력비용의 절감효과가 발생한다. 뿐만 아니라 신에너지가 친환경적으로 생산됨에 따라 도시 내 온실가스 배출 감축효과도 발생한다. 이외에도 수확된 전력으로 기존 전력을 대체함으로써 블랙아웃 대비 효과, 주민의 삶의질 향상 등의 사회효과도 압전에너지 하베스터 설치사업으로부터 유발되는 편익이라 할 수 있다.

사업의 효과는 계량화 및 가치화 여부에 따라 크게 시장재효과와 비시장재효과로 구분된다. 전자는 금전적 가치로 나타낼 수 있는 효과를, 후자는 금전적 가치로 나타낼 수 없는 효과를 의미한다. 비시장재효과 중 가치화 불능효과는 계량화는 가능하지만 금전적 가치로 나타낼 수 없는 효과를 나타내며, 계량화 불능

〈표 2〉 압전에너지 하베스터 설치사업의 비용–편익 항목화

| 구분 | 경제성 평가항목 | |
|---|---|---|
| 비용(C) | 압전에너지 하베스터 제작비용 | |
| | 압전에너지 하베스터 설치비용 | |
| | 하베스터 유지 · 보수 · 관리 비용 | |
| | 공사중 발생비용<br>– 교통혼잡<br>– 소음 및 진동 | |
| 편익(B) | 전력생산효과 | 신에너지 생산효과 |
| | | 온실가스 저감효과 |
| | 전력활용효과 | 사회효과<br>– Blackout에 대비<br>– 주민의 삶의질 향상 |

효과는 어떠한 기준에 의해서도 측정할 수 없는 효과를 의미한다(김홍배, 2008).

압전에너지 하베스터 설치로 인해 발생하는 효과를 계량화 및 가치화 여부에 따라 구분하면 〈표 3〉과 같다. 시장재 효과는 비용항목 중 압전에너지 하베스터 제작비용, 설치비용, 유지 · 보수 · 관리비용이 있다. 공사중 발생하는 비용의 경우 그에 대한 시장이 존재하지 않아 계량화가 불가능한 비시장재효과로 구분된다. 또한 공사구간이 1차로 도로 1km구간으로 짧고 공사기간도 길지 않기 때문에 본 논문에서 공사중 발생비용은 가치화하지 않기로 한다.

편익항목 중 시장재효과로는 전력 생산효과와 도시 내 온실가스 저감효과가 있다. 다만 온실가스 저감효과의 경우 국내 온실가스 관련 시장이 부재하여 여기서는 유럽의 탄소배출시장을 이용하여 효과에 대한 가치화를 진행하기로 한다. 〈표 3〉에서 사회효과는 비시장재효과로 분류된다. 그러나 본 논문에서는 사회효과를 조건부 가치측정법(contingent valuation method: CVM)을 이용하여 측정하고자 한다.

각 효과별 가치화 방법은 다음과 같다.

### 1) 비용

압전에너지 하베스터 설치사업의 총비용은 식 (1)과 같이 사회적 할인율을 적용한 연간 항목별 투입비용의 합으로 계산된다.

$$TC = \sum_t \sum_i \frac{C_i^t}{(1+r)^t}, \tag{1}$$

$TC$: 총 비용,
$C_i^t$: $t$년도 $i$항목의 비용,
$r$: 사회적 할인율.

압전에너지 하베스터 제작비용은 하베스터 개수와 제작 단가로부터 식 (2)와 같이 계산된다.

$$C_m^{\ 0} = p_m \cdot N_m \tag{2}$$

$C_m$: 압전에너지 하베스터 제작비용,
$p_m$: 하베스터 제작단가,
$N_m$: 하베스터 제작개수.

〈표 3〉 압전에너지 하베스터 설치사업의 도시적용에 따른 비용과 편익의 항목화

| 구분 | 경제성 평가항목 | | 계량화 | 가치화 | 효과 구분 |
|---|---|---|---|---|---|
| 비용(C) | 압전에너지 하베스터 제작비용 | | ○ | ○ | 시장재효과 |
| | 압전에너지 하베스터 설치비용 | | ○ | ○ | 시장재효과 |
| | 하베스터 유지 · 보수 · 관리 비용 | | ○ | ○ | 시장재효과 |
| | 공사중 발생비용<br>– 교통혼잡<br>– 소음 및 진동 | | × | × | 비시장재효과<br>(가치화불능효과) |
| 편익(B) | 전력생산효과 | 신에너지 생산효과 | ○ | ○ | 시장재효과 |
| | | 온실가스 저감효과 | ○ | △ | 시장재효과<br>(가치화불능효과) |
| | 전력활용효과 | 사회효과<br>– Blackout에 대비<br>– 주민의 삶의질 향상 | × | × | 비시장재효과<br>(가치화불능효과) |

에너지 하베스터의 설치비용은 도로 단위연장당 하베스터 매설비용으로부터 식 (3)과 같다.

$$C_p^{\,0} = p_p \bullet A_p \qquad (3)$$

$C_p$: 하베스터 설치비용,

$p_p$: 단위면적당 하베스터 설치단가,

$A_p$: 하베스터 설치면적.

에너지 하베스터의 유지 · 관리 · 보수 비용은 하베스터의 생애주기를 고려해 10년 주기로 발생함을 가정하여 계산한다(에너지평가원, 2015).

## 2) 편익

압전에너지 하베스터 설치사업의 총 편익은 식 (4)와 같이 사회적 할인율을 적용한 연간 항목별 편익의 합으로 계산된다.

$$TB = \sum_t \sum_i \frac{B_i^t}{(1+r)^t}\,, \qquad (4)$$

$TB$: 총 편익,

$B_i^t$: $t$년도 $i$항목의 편익,

$r$: 사회적 할인율.

신에너지 생산효과를 구하기 위해서는 먼저 연간 교통량을 추정해야 한다. 에너지 생산량은 추정된 교통량을 통해 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_e^t = a_e \bullet T_e^t \qquad (5)$$

$E_e^t$: $t$년도 총 전력 생산량,

$a_e$: 단위차량당 전력 생산량,

$T_e^t$: $t$년도 연간 교통량.

압전에너지 하베스터 설치에 따른 신에너지 생산 편익은 전력 생산량과 전력 단위비용으로부터 식 (6)과 같이 도출된다.

$$B_e^t = p_e \bullet E_e^t \qquad (6)$$

$B_e^t$: 전력 생산편익,

$p_e$: 전력 단가,

$A_e^t$: $t$년도 총 전력 생산량.

압전에너지 하베스터 설치에 따른 이산화탄소 저감 편익은 식 (7)~식 (8)을 통해 계산된다. 이산화탄소 발생량은 식 (7)과 같이 IPCC 가이드라인(1996)에 따른 에너지원별 이산화탄소 배출량 산정식을 통해 계산된다.

$$CO_2^{\,t} = \sum_{i=1}^{n} (E_e^t \bullet cef_i \bullet (br_i - cfr_i)) \bullet \frac{44}{12}\,, \qquad (7)$$

$CO_2^{\,t}$: 이산화탄소 발생량,

$E_e^t$: 하베스팅된 에너지 발생량,
$cef_i$: 연료 $i$의 탄소배출계수,
$br_i$: 연료의 연소율,
$cfr_i$: 연료의 탄소몰입율,
$i$: 연료의 종류(1,2,⋯, $n$)

이산화탄소 저감편익은 앞서 계산된 저감된 이산화탄소의 양과 단위 가격으로부터 계산된다.

$$B^t_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot CO_2{}^t, \quad (8)$$

$B^t_{CO_2}$: 이산화탄소 저감 편익,
$p_{CO_2}$: 이산화탄소 단위 가격.

사회효과는 조건부가치측정법(contingent valuation method: CVM)을 통해 가치화한다. 조건부가치측정법은 가상적 시장을 설정하고, 설문조사를 통해 소비자들에게 지불의사금액(willingness to pay: WTP)을 조사하여 비시장재화의 가치를 평가하는 방법이다(김홍배, 2008). 압전에너지 하베스팅으로 인한 사회효과에 대한 가치는 식 (9)~식 (13)을 통해 계산된다. 먼저 사회효과에 대한 개인의 내재된 지불의사금액을 오차 항이 정규분표를 이루는 함수로 표현하면 식 (9)와 같다. 본 논문에서는 성별, 연령, 학력, 월소득과 같은 개인설명변수를 지불의사금액의 독립변수로 설정하였다.

$$WTP_i = \alpha_0 + \alpha_1 Gen_i + \alpha_2 Age_i + \alpha_3 Edu_i + \alpha_4 Inc_i + u_i \quad (9)$$

$WTP_i$: 응답자 $i$의 내재 지불의사금액,
단, $U_i \sim N(0,\sigma_2)$.

지불의사금액 함수의 값은 일반적으로 다중 회귀식 또는 양분선택형 방법을 이용한 확률선택모형으로도 결정할 수 있다(김홍배, 2008). 본 논문에서는 양분선택법을 이용한 확률선택모형으로 응답자의 최대 지불의사금액을 결정하고자 한다. 지불의사금액 함수를 구체적으로 추정하기 위해서는 먼저 응답자에게 제시되는 지불의사금액을 포함한 로짓모형이 설정되어야 하는데 이는 식 (10)과 같다. 양분선택법에 따르면 응답자들은 설문지에 제시된 사회효과 대한 특정 지불의사금액($t_i$)에 따라 수락 또는 거절의 의사를 표시한다. 그러므로 응답자가 선택 가능한 대안은 두 가지만 존재하게 된다.

$$y_i = \gamma_0 t_i + \beta_0 + \beta_1 Gen_i + \beta_2 Age_i + \beta_3 Edu_i + \beta_4 Inc_i, \quad (10)$$

$$y_i = \begin{cases} 0\text{: 응답자가 제시된 금액을 수락한 경우} \\ 1\text{: 응답자가 제시된 금액을 거절한 경우} \end{cases}$$

$t_i$: 제시된 지불의사금액

식 (10)에 대해 최우추정법을 이용하여 각 설명변수의 계수인 $\gamma_0$와 $\beta_i$는 각각 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\gamma_0 = (-)\frac{1}{\sigma}, \ \beta_i = \frac{\alpha_i}{\sigma} \quad (11)$$

위와 같은 관계에서 식 (9)의 지불의사금액 함수의 설명변수 계수인 $\alpha_i$는 아래의 식 (12)과 같이 $\beta_i$를 $\gamma_0$의 절댓값으로 나눔으로써 추정된다.

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{|\gamma_0|} \quad (12)$$

이러한 과정을 통해 추정된 계수 $\alpha_i$와 설문을 통해 얻어진 응답자 $i$의 개인설명변수를 식 (9)에 대입함으로써 사회효과에 대한 응답자 $i$의 지불의사금액($WTP_i$)을 추정할 수 있다. 이때 전체 사회효과의 편익은 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_s^t = y \cdot \overline{WTP}_i \cdot R_{effect}, \quad (13)$$

$B_s^t$: $t$년도 사회효과 편익,
$y$: 지불의사비율,
$\overline{WTP}$: 추정된 평균 지불의사금액,
$R_{effect}$: 사업 영향인구수.

이때 본 논문에서는 사업 효과의 공간적 범위를 생산된 전력이 직접적으로 공급되는 공간으로 한정하였다. 다시 말해, 사업의 영향을 받는 인구수는 에너지

하베스터 설치로 수확된 전력량에 비례한다. 따라서 사업 영향인구수는 다음 식 (14)와 같이 산정된다.

$$R_{effect} = \frac{E_e^t}{a_r} \quad (14)$$

$E_e^t$: $t$년도 총 에너지 생산량,

$a_r$: $r$지역 인구 1인당 가로등 소비전력.

## 4. 분석결과

### 1) 비용

본 절에서는 각 비용항목에 대한 분석 결과를 제시한다. 각 항목별 비용 분석 결과는 다음과 같다(여기서 하베스터 제작단가, 사업규모, 설치면적, 유지 · 관리 · 보수비용 자료는 한국에너지기술평가원(2015) 자료를 이용하였다).

하베스터 1개의 제작단가는 148,000원이며 1차로 1km구간을 매설하는데 하베스터가 6,666개가 필요하다. 이에 따라 총 압전에너지 하베스터 제작비용은 약 987백만 원으로 산정되었다.

설치단가 자료는 한국도로공사(2003) 자료를 사용하였다. 설치단가는 $1m^2$당 20,180원, 총 하베스터 설치면적은 $720m^2$이며 압전에너지 하베스터를 매설하는 데 드는 비용은 약 15백만 원으로 산정되었다. 10년 주기로 총 2번의 유지 · 관리 · 보수비용을 지불할 때의 연간비용은 약 6백만 원으로 나타났다.

종합하면 할인율을 고려한 압전에너지 하베스터 설치사업의 총비용은 10억 7백만 원으로 계산되었다.

### 2) 편익

편익항목의 경우 설치 이후 사업기간동안 매년 그 효과가 지속적으로 발생하게 된다. 본 절에서는 편의상 2016년 기준의 편익을 설명하고 연도별 편익은 〈부록 1〉에서 명시하기로 한다. 2016년 기준 각각의 편익효과는 다음과 같이 계산된다(여기서 단위차량당 에너지 생산량 자료는 한국에너지기술평가원(2015) 자료를 이용하였다).

본 논문에서는 2002년부터 2014년까지의 고속도로교통량통계(한국도로공사, 2016)를 이용하여 연도별 교통량을 추계하였다. 경부고속도로의 신갈JC~수원신갈IC구간의 연간교통량은 2016년 기준 총 221,497대로 추정된다. 단위차량당 에너지 생산량은 0.02kWh/대이다. 식 (5)에 따라 2016년 기준 연간 총 에너지생산량은 1,616,925kWh로 산정되었다. 한국전력에서 제공하는 전력수급계약(PPA)의 전력 구입가격 203.32원/kWh를 단위전력당 전기가격으로 설정하면 2016년 기준 연간 신에너지 생산편익은 약 41백만 원으로 계산된다.

온실가스 저감효과의 경우 자료의 한계로 온실가스 종류를 $CO_2$, $NO_X$, $SO_X$로 한정하여 분석을 진행했다. 각 온실가스별 단위전력당 저감편익은 유럽의 탄소시장가격(ICE traded price, 2016.5.20.기준)[1]과 한국환경정책평가연구원(2002)을 바탕으로 $CO_2$가 4.0원/kWh, $NO_X$가 43.4원/kWh, $SO_X$가 15.2원/kWh로 산정되었다. 이를 바탕으로 압전에너지 하베스터 설치사업의 온실가스 저감편익을 분석한 결과 2016년 기준 $CO_2$ 저감편익은 약 1백만 원, $NO_X$ 저감편익 약 9백만 원, $SO_X$ 저감편익 약 3백만 원으로 총 13백만 원으로 산정되었다.

압전에너지 하베스터 설치사업의 사회효과를 계산하기 위해 대상지인 경기도 용인시의 20대 이상 성인을 대상으로 지불의사비용 관련 설문조사를 실시하였다. 설문조사는 대면조사방식으로 진행되었고 조사기간은 2016년 5월 10일부터 5월 23일까지 진행되었다. 총 240부 중 209부의 유효부수를 바탕으로 분석을 진행하였다. 설문 문항은 '압전 에너지 발전 도로 시스템의 시행으로 인해 귀하 가구의 삶의 질이 향상된다면, 이를 위해 귀하 가구는 사업시행에 따른 추가 부담금을 연간 t원의 세금으로 지불하실 용의가 있으십니까?'이다. 위 질문에 "예"라고 응답한 경우 초기금액 t의 두배 금액을 제시하고, "아니오"라고 응답한 경우에는 초기금액 t의 절반 금액을 제시하였다. 초기금액 t는 사전조사를 통해 얻은 결과로부터 5,000원부터 10,000원까지의 총 6개로 설정하였다. 설문에 참여한 응답자의 기술통계량은 다음 〈표 4〉와 같다. 해당 사업에 지불의사가 있는 비율은 약 67%로 나타났다.

〈표 4〉 기술통계량

| 구분 | 최솟값 | 최댓값 | 평균 | 표준편차 |
|---|---|---|---|---|
| 성별 | 0 | 1 | 0.69 | 0.548 |
| 연령 | 1 | 5 | 2.52 | 1.047 |
| 최종학력 | 1 | 5 | 4.34 | 0.743 |
| 월소득 | 1 | 9 | 3.2 | 1.785 |
| 제시금액 | 2.5 | 8 | 5.60 | 1.899 |
| 지불의사 | 0 | 1 | 0.67 | 0.471 |
| 유효수(n) | 209 | | | |

주) 성별(0: 여성, 1: 남성)
연령(1: 20–29세, 2: 30–39세, 3: 40–49세, 4: 50–59세, 5: 60세 이상)
최종학력(1: 초등학교, 2: 중학교, 3: 고등학교, 4: 대학교, 5: 대학원 이상)
월소득(1: 100만원 미만, 2: 100–199만원, 3: 200–299만원, 4: 300–399만원 5: 400–499만원, 6: 500–599만원, 7: 600–699만원, 8: 700–799만원, 9: 800만원 이상)
제시금액(천 원)

본 논문은 로짓모형을 이용하여 식 (9)의 상관계수를 〈표 5〉와 같이 도출하였다. 연령변수를 제외한 모든 독립변수가  통계적으로 1% 이내로 유의한 것으로 나타났다. 분석 결과 거주민이 남성일수록, 학력이 높을수록, 월소득이 높을수록 압전에너지 하베스팅 사업에 대한 지불의사가 높았다. 분석된 상관계수와 식 (9)를 이용하여 압전에너지 하베스터 설치사업의 최종 가구당 연평균 지불의사금액은 6,707원/인으로 도출되었다. 대상지인 경기도 용인시의 1인당 가로등소비전력[2)]은 약 39.2kWh/인으로 이 값을 식 (14)에 대입하면 사업의 영향인구 수가 총 5,156명으로 나타난다. 지불의사가 있는 비율은 총 67%이므로 산정된 지불의사금액과 영향인구 수, 지불의사비율을 식 (13)에 대입하면 2016년 기준 사회효과 편익은 총 23백만 원으로 계산된다. 할인율을 고려한 압전에너지 하베스터 설치사업의 총편익은 10억 16백만 원으로 계산되었다.

### 3) 소결

앞에서 추정된 비용과 편익을 통한 ‘압전에너지 하베스터 설치사업’의 경제성분석 결과는 〈표 6〉과 같다. 압전에너지 하베스터 설치사업의 총 비용은 약 10억 7백만 원이며 총 편익은 약 10억 16백만 원으로 분

〈표 5〉 사업에 대한 주민 지불의사분석 결과

| 구분 | Coef. | Std.Err. | t |
|---|---|---|---|
| 성별 | 0.853** | 0.343 | 2.48 |
| 연령 | 0.260 | 0.177 | 1.43 |
| 학력 | 0.874*** | 0.256 | 3.47 |
| 월소득 | 0.352*** | 0.129 | 2.72 |
| 상수항 | –2.290* | 1.242 | –1.78 |
| 제시금액(β) | –.533*** | 0.112 | –5.01 |
| WTP | 6,707 | | |
| –2LL | 221.534 | | |
| Preudo R2 | 0.188 | | |

***p〈0.01, **p〈0.05, *p〈0.1

석되었다. 이에 따른 편익비용비(B/C)는 약 1.01로 분석되었으며 순현재가치(NPV)는 약 9백만 원으로 나타났다. 따라서 압전에너지 하베스팅 설치사업은 경제성이 있는 사업이라 할 수 있다. 특히 전력활용효과를 고려하지 않은 사업의 편익비용비(0.71)와 본 연구의 분석결과를 비교하면 에너지 하베스팅 기술의 전력활용효과의 중요성을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후연구과제

본 논문은 고속도로 내 압전에너지 하베스터 설치사업으로 발생하는 사회 · 경제적 효과를 분석하여 사업의 경제성을 평가하였다. 이때 사업의 편익으로 비시장재효과인 기존전력대체에 따른 사회효과를 분석에 고려하기 위해 조건부가치측정법을 이용하였다.

본 논문은 사업의 사회적효과를 고려하여 압전에너지 하베스터 설치사업 실용화의 가능성을 조명했다는 점에서 의의가 있다. 향후 압전에너지 하베스팅 기술의 발전으로 하베스터의 제작단가가 감소되거나 하베스터의 에너지생산효율이 증가하면 사업의 경제성은 더욱 증대될 것으로 전망된다. 또한 압전에너지 하베스팅 기술에 대한 홍보 및 주민 교육이 이루어진다면 더 높은 사회복지효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 압전에너지 하베스터를 성공적으로 도시에 적용시키기 위해서는 압전에너지 하베스팅 기술 연구 및 홍보에 대한 지속적인 지원이 요구된다. 또한

〈표 6〉 압전에너지 하베스터 설치사업의 경제성분석 결과

| 구분 | | 경제성 평가항목 | | 금액(백만원) | 긍정 효과 | 부정 효과 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 비용(C) | 시장재 효과 | 하베스터 제작비용 | | 987 | | ○ |
| | | 하베스터 설치비용 | | 15 | | ○ |
| | | 하베스터 보수 · 유지관리 비용 | | 6 | | ○ |
| | 비시장재 효과 | 공사 중 발생비용<br>– 교통혼잡<br>– 소음 및 진동 | | – | | ○ |
| 편익(B) | 시장재 효과 | 전력생산효과 | 신에너지 생산효과 | 543 | ○ | |
| | | | 온실가스 저감효과 | 167 | ○ | |
| | 비시장재 효과 | 전력활용효과 | 사회효과<br>– Blackout에 대비<br>– 지역 주민의 삶의 질 향상 | 306 | ○ | |
| 총비용 | | | | 1,007 | | |
| 총편익 | | | | 1,016 | | |
| 편익–비용 비 (B/C) | | | | 1.01 | | |
| 순 현재가치 (NPV) | | | | 9 | | |

향후 본 논문을 바탕으로 실용화를 위한 압전에너지 하베스터 설치사업의 제도화 방안에 대한 연구가 진행되기를 기대한다.

## 주

1) http://www.theice.com/
2) 연간 용인시 가로등소비전력을 용인시 인구로 나누어 계산하였다.

## 참고문헌


교통안전공단, 2016. 『교통물류 온실가스 배출량 조사보고서』.

김홍배, 2008. 『정책평가기법: 비용편익분석론』.

김효진 · 진규남 · 박지영 · 강문식 · 노명현, 2014. 『에너지 하베스팅 기술의 주택 · 도시 적용을 위한 기초 및 실용화 방안 연구(2)』. 한국토지주택공사 발간자료.

박지영 · 김효진, 2014, 에너지 하베스팅 기술의 주택, 도시 적용, 『전산구조공학』, 27(1).

유병곤, 2008, MEMS 기술을 이용한 에너지 하베스팅 기술, 『전자통신동향분석』, 23(6).

이동민 · 유정복 · 연지윤, 2009, 『녹색성장 구현을 위한 도로부문 정책개발』, 한국교통연구원 기본연구보고서.

이덕희, 2011, 녹색 사회기반시설을 위한 열 에너지 하베스팅에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문.

이창훈, 2005, 『신재생에너지전력 시장 활성화 방안 연구』, 한국환경정책평가연구원.

이철용, 2014, 『신재생에너지에 대한 지불의사액 추정 및 사회적 수용성(PA) 제고 방안』, 에너지경제연구원

임소영 · 허은녕, 2008, 신재생에너지분야 전문가의 지불의사액 조사 연구, 『신재생에너지』, 4(4).

한국개발연구원, 2008, 『예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정 · 보완 연구』.

한국과학기술정보연구원, 2013, 『압전에너지 하베스팅 기술동향 및 전망』.

한국도로공사, 2003, 『2003년도 고속국도 실시설계』.

한국도로공사, 2016, 『고속도로교통량조사』.

한국에너지기술평가원, 2015, 『도로교통 미활용에너지이용을 위한 압전에너지 하베스터 개발 및 실증 1차년도 연차보고서』.

한국환경정책평가연구원, 2002, 『육상교통수단의 환경성 비교분석』.

IPCC, 1996, 『Reviced 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories』.

Lee, min gi & Kim, Hong Bae, 2016, A cost-benefit analysis for the institutionalization of the green certification scheme: the case of the development of the Sinjung district in Seoul, Korea, 『International Journal of Urban Science』, 20(1).

Li, H., Jenkins-Smith, H. C., Silva, C. L., Berrens, R. P. & Herron, K. G., 2008, Public support for reducing US reliance on fossil fuels: Investigating household willingness-to-pay for energy research and development,『Ecological Economics』, 68(3).

게재신청 2017.6.21
심사일자 2017.7.11
게재확정 2017.8.28
주저자: 이현경, 교신저자: 김홍배

〈부록 1〉 압전에너지 하베스터 설치사업 연도별 편익

| 사업 년도 | 신에너지 생산효과 (백만원) | | 온실가스 저감효과 (백만원) | | 사회효과 (백만원) | | 합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 편익 | 현재가치 | 편익 | 현재가치 | 편익 | 현재가치 | |
| 0 | 41 | 41 | 13 | 13 | 23 | 23 | 77 |
| 1 | 41 | 39 | 13 | 12 | 23 | 22 | 73 |
| 2 | 42 | 37 | 13 | 11 | 23 | 21 | 70 |
| 3 | 42 | 36 | 13 | 11 | 24 | 20 | 67 |
| 4 | 42 | 34 | 13 | 10 | 24 | 19 | 64 |
| 5 | 42 | 32 | 13 | 10 | 24 | 18 | 61 |
| 6 | 43 | 31 | 13 | 9 | 24 | 17 | 58 |
| 7 | 43 | 29 | 13 | 9 | 24 | 17 | 55 |
| 8 | 43 | 28 | 13 | 9 | 24 | 16 | 53 |
| 9 | 43 | 27 | 13 | 8 | 24 | 15 | 50 |
| 10 | 44 | 26 | 13 | 8 | 25 | 14 | 48 |
| 11 | 44 | 24 | 13 | 7 | 25 | 14 | 46 |
| 12 | 44 | 23 | 14 | 7 | 25 | 13 | 43 |
| 13 | 44 | 22 | 14 | 7 | 25 | 12 | 41 |
| 14 | 45 | 21 | 14 | 6 | 25 | 12 | 39 |
| 15 | 45 | 20 | 14 | 6 | 25 | 11 | 38 |
| 16 | 45 | 19 | 14 | 6 | 25 | 11 | 36 |
| 17 | 45 | 18 | 14 | 6 | 26 | 10 | 34 |
| 18 | 46 | 17 | 14 | 5 | 26 | 10 | 33 |
| 19 | 46 | 17 | 14 | 5 | 26 | 9 | 31 |
| 합계 | – | 543 | – | 167 | – | 306 | 1,016 |