

도시열섬현상 저감정책의 경제성 분석에 관한 연구^{*,**}

: 서울시 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업을 중심으로

A Cost-benefit Analysis for Urban Heat Island Mitigation Policy

: Focused on the Installation of Green and Cool Roofs in Seoul, Korea

이현경^{***} · 이민기^{****} · 주진호^{*****} · 김홍배^{*****}

Lee, Hyun-Kyung · Lee, Min-Gi · Joo, Jin-Ho · Kim, Hong-Bae

Abstract

Green- and cool-roof installations have been recognized as effective means to mitigate the urban heat island effect. Despite their usefulness as a policy, there has been little attention to their economic feasibility. This study attempts to conduct a cost-benefit analysis for two policies concerning green- and cool-roof installations in Seoul, Korea. The contingent valuation method was employed to assess their non-market effects on local amenities, including the thermal comfort of residents and city aesthetics, revealing that the non-market effect of the green-roof installation was 1.72 times greater than that of the cool-roof installation. This is because the former could ameliorate not only thermal comfort but also other amenities, while the latter only improves thermal comfort. To synthesize, the green-roof installation policy is economically more feasible and meaningful than the cool-roof installation policy. Finally, this study suggests a policy direction for urban heat island mitigation based on the results obtained.

주제어 도시열섬현상, 쿨루프, 옥상녹화, 경제성분석, 서울

Keywords Urban Heat Island, Cool Roof, Green Roof, Cost-benefit Analysis, Seoul

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 우리나라에서 폭염, 열대야 등을 비롯한 이상 고온 현상이 빈번하게 발생하고 있다. 2018년 전국의 여름철 평균기온은 25.5℃로 1973년 통계 작성 이후 가장 기온이 높았다(기상청,

2018). 이러한 이상 고온현상은 도시열섬현상으로 인해 도시 내부에서 더욱 악화된다(Herrera-Gomez et al., 2017; 권용석, 2018). 도시열섬현상이란 도시 내부기온이 외부기온보다 2~3℃ 정도 높은 현상을 말한다(Oke, 1982; Klen and Coffman, 2015). 도시열섬현상은 도시 내 인공 토지피복 증가와 인구밀도 증가로 인한 도시열 상승 등에서 기인한다(Taha, 1997; 김현옥·염종민, 2012).

도시열섬현상의 주된 문제점은 주민 열쾌적성(thermal

* 본 논문은 환경부 도시 생태계 서비스 통합 유지·관리 기술 개발사업의 연구비지원(2020002780001)에 의하여 수행되었음.

** 본 논문은 국토교통과학기술진흥원 열섬저감 도시공간 설계기술·개발사업의 연구비지원(20AUDP-B102559-06)에 의해 수행되었으며, "열섬저감 도시 설계기술·개발 5차년도 연차보고서"를 토대로 수정·보완하였음.

*** Post-doc., Hanyang University (First Author: lhk29@nate.com)

**** Researcher, Land & Housing Institute (6257alsri@lh.or.kr)

***** Doctoral Student, Hanyang University (ju1431@hanyang.ac.kr)

***** Professor, Hanyang University (Corresponding Author: hokim@hanyang.ac.kr)

comfort)의 저하에 있다고 할 수 있다(Loibl et al., 2015; Kim et al., 2016). 왜냐하면 주민들의 열쾌적성 저하는 열대야로 인한 불면증과 온열질환 등의 건강관련 사회비용을 야기할 뿐만 아니라 에너지수요 증가, 외부활동 억제, 생산성 하락 등 경제적으로도 부정적 영향이 확대되기 때문이다(Deschênes and Moretti, 2009; Kjellstrom et al., 2009).

서울시는 우리나라 16개 광역시·도 중에서도 인구밀도가 가장 높고 도시열섬현상이 뚜렷이 나타나는 도시이다(오규식·홍재주, 2005). 이러한 현상은 시가화 지역 내 높은 불투수층 비율(77%)에서 기인한다고 할 수 있다(조항문·이윤혜, 2018). 서울시는 도시열섬현상 저감을 위해 다양한 정책을 추진하고 있으며 특히 서울시 시가화 면적의 약 28%를 차지하는 건물의 옥상을 활용하는 정책에 주목하고 있다. 그 이유는 도심 내에 별도의 토지보상비 없이 도시열섬현상을 저감할 수 있기 때문이다(여규동·정영훈, 2013). 옥상활용은 크게 건물의 옥상을 반사율이 높은 도로로 도포하는 쿨루프(cool roof) 사업과 인공지반 녹지로 변경하는 옥상녹화(green roof) 사업으로 구분할 수 있다.

쿨루프 사업과 옥상녹화 사업은 모두 도시열섬현상 저감효과를 가진다는 공통점이 있지만, 설치비용과 부가적인 효과 등에서 차이가 있다. 전자는 투입되는 비용이 낮은 장점이 있는 반면에 도시열섬현상 저감효과 이외에 도시미관 향상, 도시농업 활용 등과 같은 주민 어메니티(amenity)와 관련된 부가적인 효과는 없다. 반면 후자는 설치비용은 상대적으로 높지만 위에서 말한 부가적인 효과가 발생한다는 장점이 있다(Gagliano et al., 2015; Karlsson et al., 2020).

문헌을 살펴보면 다수의 연구가 쿨루프 및 옥상녹화 사업의 도시열섬현상 저감효과를 구체적으로 제시하였다(Coutts et al., 2013; Gagliano et al., 2015; 김희주 외 2018; Imran et al., 2018; Yang et al., 2018; Cai et al., 2019; 국토교통과학기술진흥원, 2019). 그러나 이러한 정책이 도시열섬현상 저감정책으로써 가치를 갖기 위해서는 기본적으로 경제적 타당성이 확보되어야 한다. 왜냐하면 이러한 공공정책 집행에는 자원이 투입되기 때문이다.

국내에서는 옥상녹화 사업에 대한 경제성 분석에 관한 연구(이주희 외, 2010; 김정호·윤용한, 2011; 여규동·정영훈, 2013; 김홍순 외, 2014)가 다수 진행된 반면 쿨루프 사업의 경제성을 분석한 연구는 드문 실정이다. 그 결과 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 선택에 활용되기에는 한계가 있었다. 김준우·엄정섭(2012)은 옥상녹화와 쿨루프 사업을 비용측면에서 비교하였으나 각 사업의 편익효과는 고려되지 못했다. 또한 공통적으로 사업의 핵심효과인 도시열섬현상 저감에 따른 주민 열쾌적성 향상효과는 고려하지 못하였다.

국외 선행연구 중 옥상녹화 사업과 쿨루프 사업의 비시장재효과를 가치화한 연구(Berto et al., 2018; Zhang et al., 2019a; Zhang et al., 2019b; Berto et al., 2020)는 옥상녹화 사업의 도

시미관 향상 등의 부가적인 효과에 초점을 맞추어 진행되었다. 그러나 국내연구와 마찬가지로 도시열섬현상 저감에 따른 주민 열쾌적성 향상효과는 고려되지 못했다. 이러한 한계는 사업에 따른 구체적인 기온저감량에 대한 고려가 미흡한 데서 기인한다고 할 수 있다.

따라서 본 논문은 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 도시열섬현상 저감에 따른 주민 쾌적성 향상 효과를 가치화하고 이를 경제성 분석에 반영하여 두 사업의 경제성을 비교분석하는 데에 목적이 있다. 본 논문에서는 기존 연구의 한계를 보완하기 위해 두 정책의 기온저감에 따른 주민 열쾌적성 향상효과와 기타 어메니티 향상효과 등을 조건부가치추정법(contingent valuation method, CVM)으로 가치화한다. 이때 구체적인 각 사업의 기온저감량은 국토교통과학기술진흥원(2019)에서 분석한 결과를 사용한다.

2. 연구의 범위 및 체계

본 논문의 시간적 범위는 국토교통과학기술진흥원(2019)의 기준년도인 2018년으로 한다. 공간적 범위는 국토교통과학기술진흥원(2019)에서 선정된 대상지인 마포구 서교동 일원, 성북구 장위4구역, 송파구 잠실5단지로 한정한다. 대상지 선정 이유는 각 대상지가 서울시의 건조환경 유형별 대표지역이기 때문이다. 여기서 유형은 상업+주거 혼합지역(서교동일원), 다세대, 다가구 밀집지역(장위4구역), 판상형 아파트 밀집지역(잠실5단지)으로 구분된다(국토교통과학기술진흥원, 2019).

본 논문은 4절로 구성된다. 2절에서는 경제성 분석을 위한 체계가 구축되고 3절에서는 구축된 체계를 바탕으로 대상지 내 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 경제성을 각각 분석한다. 분석 결과를 바탕으로 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 경제성을 평가하고 비교한다. 마지막 4절에서 연구를 요약하고 향후 연구과제를 제시한다.

II. 분석 체계 구축

본 절에서는 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 경제성을 분석하기 위한 체계가 구축되며 분석 체계는 다음과 같이 3개의 부문(분석의 전제 및 효과의 항목화, 효과별 가치화방안, 경제성평가)으로 구성된다.

1. 분석의 전제 및 효과의 항목화

경제성분석을 진행하기에 앞서 쿨루프 및 옥상녹화 사업효과와 공간적 범위, 시간적 범위, 사회적 할인율을 전제한다. 우선 사업효과와 공간적 범위는 도시열섬현상 저감정책 실시로 직접적인 사회적 영향을 받는 범위를 의미한다. 본 논문에서는 사업의 규모, 자료 구득의 용이성을 고려하여 대상지를 포함한 행정

동(서교동, 장위동, 잠실3동)으로 한정한다. 시간적 범위는 쿨루프 및 옥상녹화 사업의 생애주기를 고려하여 2018년~2047년, 총 30년으로 한정한다. 사회적 할인율은 예비타당성조사 수행 총괄 지침 제3장 제52조에서 제시한 4.5%를 적용한다.

쿨루프 및 옥상녹화 사업으로 인해 발생하는 효과들을 항목화하여 비용 및 편익항목으로 구분하면 <표 1>과 같다. 우선 비용은 사업에 투입되는 설치비용과 수리 및 유지·관리하기 위한 비용을 모두 포함한다. 이밖에 쿨루프 사업 시 나타나는 눈 피로도 증가 등과 같은 외부비용이 발생한다.

편익은 크게 경제적, 환경적, 사회적 편익으로 구분할 수 있다. 이 중 경제적 편익은 에너지절감편익과 지역경제활성화편익이 해당된다. 환경적 효과는 이산화탄소 저감편익이, 마지막으로 사회적 편익은 건강증진편익(고온환경으로 인해 발생하는 주민의 의료비절감)과 주민 쾌적성향상 효과를 기대할 수 있다. 이때 주민 쾌적성향상 효과의 정의는 사업마다 차이가 있다. 옥상녹화

사업은 열쾌적성 향상효과와 함께 도시미관 향상, 활용 가치 증대 등과 같은 어메니티 향상효과를 주민쾌적성 향상효과로 정의한다. 한편 쿨루프 사업은 앞서 정의한 어메니티 향상효과는 없다고 전제한다.

2. 효과별 가치화

사업의 효과는 계량화 및 가치화 여부에 따라 <표 2>와 같이 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 불능효과는 어떠한 기준에 의해서도 측정할 수 없는 효과를 의미한다(김홍배, 2008). 시장재비용은 비용항목 중 도시열섬현상 저감정책 설치비용, 수선·교체비용, 유지·관리비용이 있다. 시장재편익으로는 에너지(전력) 절감편익과 지역경제 활성화편익, 건강증진편익이 있다. 이때 지역경제 활성화편익은 이전소득(transfer payment)이므로 가치화하지 않는다.

한편 비시장재효과는 쿨루프의 외부비용, 이산화탄소 저감편익과 주민 쾌적성 향상 효과로 분류된다. 도시열섬현상 저감정책과 같은 공공정책의 대표적인 특성 중 하나는 비시장재효과가 매우 크다는 것이다. 즉, 공공재 공급에 대하여 사회적 후생을 극대화하는 정책 결정을 위해서는 비시장재효과가 정책 결정에 고려되어야 한다. 이에 따라 본 논문에서는 도시열섬현상 저감정책의 비시장재효과를 가치화하기로 한다. 이산화탄소 저감편익의 경우 유럽의 탄소배출시장의 2015~2017년 평균 탄소배출권 거래가격을 이용하여 가치화하고 주민 쾌적성향상 효과 및 쿨루프의 외부비용은 조건부가치측정법(Contingent Valuation Method, CVM)에 따라 산정한다.

표 1. 도시열섬현상 저감정책의 비용 및 편익 항목화

Table 1. Cost-Benefit Itemization of UHI mitigation policy

Divisions		Items
Costs		Installation costs
		Repair & Replacement costs
		Maintenance costs
		External costs
Benefits	Economic effects	Energy (Electricity) reduction
		Regional economic vitalization
	Environmental effects	CO ₂ reduction
	Social effects	Health promotion
		Amenity improvement

표 2. 도시열섬현상 저감정책의 효과구분

Table 2. Classification of effects of UHI mitigation policy

Divisions	Items	Quantification	Valuation	Class	Note
Costs	Installation costs	○	○	Market effect	
	Repair & Replacement costs	○	○	Market effect	
	Maintenance costs	○	○	Market effect	
	External costs - Eye Strain	×	×	Non-market effect	
Benefits	Economic effects				
		Energy (Electricity) reduction	○	○	Market effect
		Regional economic vitalization	○	○	Market effect TP ¹⁾
	Environmental effects	CO ₂ reduction	○	×	Non-market effect Using Europe Carbon Market Price
	Social effects	Health promotion	○	○	Market effect
		Amenity improvement - Thermal comfort improvement - Ancillary amenity improvement	×	×	Non-market effect

○: Possible, X: Impossible, ¹⁾ TP, Transfer Payment

각 효과별 구체적인 가치화 방법은 다음과 같다. 이때 효과는 연간 비용 및 편익을 의미한다.

1) 시장재효과

• 시장재비용효과

쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 설치비용은 식 (1)과 같이 설치 비용 원단위와 설치면적을 바탕으로 산정된다.

$$C_f^{install} = \alpha_f^{install} \times A_f^{install}, \quad (1)$$

$C_f^{install} (A_f^{install})$: 사업 f 의 설치비용(면적),
 $\alpha_f^{install}$: 사업 f 의 설치비용 원단위,
 f : 쿨루프, 옥상녹화.

수선·교체비용은 사업별 수선·교체비용 원단위와 수선·교체 면적을 바탕으로 계산된다.

$$C_f^{replace} = \beta_f^{replace} \times A_f^{replace}, \quad (2)$$

$C_f^{replace} (A_f^{replace})$: 사업 f 의 수선·교체 비용(면적),
 $\beta_f^{replace}$: 사업 f 의 수선·교체비용 원단위.

유지·관리비용은 사업별 유지·관리비용 원단위와 유지·관리 면적을 바탕으로 계산된다.

$$C_f^{maintain} = \gamma_f^{maintain} \times A_f^{maintain}, \quad (3)$$

$C_f^{maintain} (A_f^{maintain})$: 사업 f 의 유지·관리 비용(면적),
 $\gamma_f^{maintain}$: 사업 f 의 유지·관리비용 원단위.

• 시장재편익효과

에너지(전력) 절감편익은 식 (4)와 같이 각 사업 시행에 따른 에너지 소비절감량과 에너지가격의 곱으로 나타낸다.

$$B_f^{energy} = E_f^{reduction} \times P^{energy}, \quad (4)$$

B_f^{energy} : 사업 f 의 에너지(전력) 절감편익,
 $E_f^{reduction}$: 사업 f 의 에너지(전력) 소비절감량,
 P^{energy} : 에너지(전력) 가격.

이때 사업별 에너지 소비절감량은 다음 식 (5)와 같다.

$$E_f^{reduction} = \kappa^{temp} \times |\Delta T_f| \times E^{cons}, \quad (5)$$

κ^{temp} : 기온 1℃ 변화에 따른 에너지소비 절감비율,
 ΔT_f : 사업 f 적용에 따른 대상지 기온변화량,
 E^{cons} : 대상지 에너지(전력) 소비량.

건강증진편익은 식 (6)과 같이 고온환경으로 인해 발생할 수 있

는 온열질환 의료비절감액으로 나타낼 수 있다.

$$B_f^{health} = H_f^{reduction} \times H^{cost}, \quad (6)$$

B_f^{health} : 사업 f 의 건강증진편익,
 $H_f^{reduction}$: 사업 f 의 온열질환자 절감 수,
 H^{cost} : 온열질환자 일인당 평균 의료비.

기온저감에 따른 온열질환자 절감 수는 다시 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_f^{reduction} = \lambda^{temp} \times |\Delta T_f| \times H^{patient}, \quad (7)$$

λ^{temp} : 기온 1℃ 변화에 따른 온열질환자 절감비율,
 ΔT_f : 사업 f 에 따른 대상지 기온변화량,
 $H^{patient}$: 대상지 연간 온열질환자 수.

2) 비시장재효과

비시장재효과 또한 시장재효과와 같이 비시장재비용과 비시장재편익으로 구성된다. 본 연구에서 비시장재비용은 쿨루프의 외부비용(빛 반사에 따른 눈피로도 증가), 비시장재편익은 이산화탄소저감편익과 주민쾌적성 향상효과로 구성된다.

우선 이산화탄소 저감편익은 식 (5)에서 산출된 에너지 절감량과 연관성이 높기 때문에 아래와 같이 계산된다.

$$B_f^{co_2} = E_f^{reduction} \times ce^{co_2} \times P^{co_2}, \quad (8)$$

$B_f^{co_2}$: 사업 f 의 이산화탄소 저감편익,
 $ce^{co_2} (P^{co_2})$: 이산화탄소 배출원단위(가격),

이산화탄소저감편익을 제외한 비시장재효과와 가치화는 모두 조건부가치측정법으로 방법상 동일하기 때문에 비시장재비용 및 편익효과를 통합하여 가치화 방안을 제시한다. 조건부가치측정법은 사람들이 비시장재에 대해 부여하고 있는 지불의사금액(Willingness to Pay, WTP)을 설문을 통하여 분석하는 방식이다. 본 논문에서는 지불의사 유도방법은 효율성이 높은 이중양분선택형 질문법(double bounded dichotomous choice)을 선택한다.¹⁾

지불의사금액함수는 쿨루프와 옥상녹화 사업 설치 전과 후의 효용수준 및 응답자의 소득, 선호 등에 따라 결정된다. 지불의사 금액함수를 도출하기 위하여 본 논문에서는 식 (9)과 같이 선형형태의 간접효용함수를 설정한다.

$$V_0 = \alpha_0 + \beta y + e_0, \quad V_1 = \alpha_1 + \beta y + e_1, \quad (9)$$

$V_{0(1)}$: 도시열섬현상 저감정책 적용 전 (후) 효용,
 $\alpha_{0(1)}$: 정책 전 (후) 개인선택특성
 $(\alpha_{0(1)} = \gamma_{0(1)} + \sum_{k=1}^K \gamma_{k,0(1)} X_k, X_k: \text{개인특성}),$
 β : 소득의 한계효용, y : 소득.

응답자의 내재된 최대 지불의사금액은 아래의 식을 만족하며, 최대지불의사금액함수는 아래 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}\alpha_0 + \beta y + e_0 &= \alpha_1 + \beta(y - y^*) + e_1, \\ y^* &= \frac{(\alpha_1 - \alpha_0) + (e_1 - e_0)}{\beta} = \frac{\alpha + e}{\beta}, \\ y^* &: \text{응답자의 최대 지불의사금액.}\end{aligned}\quad (10)$$

한편 간접효용함수에서 다음 식 (11)이 충족되면 응답자는 제시금액 B 에 대해 '예'라고 응답하게 된다.

$$\begin{aligned}\Delta_U &= V_1 - V_0 \\ &= \alpha_1 + \beta(y - B) + e_1 - (\alpha_0 + \beta y + e_0) \\ &= \alpha - \beta B + e \geq 0, \\ B &: \text{제시금액.}\end{aligned}\quad (11)$$

오차항이 로짓분포를 따른다고 가정하면 제시금액 B 에 대해 '예'라고 응답할 확률함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P^Y(B) = \frac{1}{\exp(-\alpha + \beta \ln(B))}, \quad (12)$$

$P^Y(B)$: 응답자 i 가 B 에 대해 '예' 응답할 확률.

한편 응답자 i 가 이중양분선택형 질문에 대해 응답할 수 있는 경우의 수는 4가지이며, 각각의 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}I_i^{YY}(B, B^H) &= \text{Prob}(B^H \leq y_i^*) \\ I_i^{YN}(B, B^H) &= \text{Prob}(B \leq y_i^* < B^H), \\ I_i^{NY}(B, B^L) &= \text{Prob}(B^L \leq y_i^* < B), \\ I_i^{NN}(B, B^L) &= \text{Prob}(y_i^* < B^L), \\ I_i^{YY}(B, B^H) &: \text{응답자 } i \text{가 (예, 예) 응답할 확률,} \\ I_i^{YN}(B, B^H) &: \text{응답자 } i \text{가 (예, 아니오) 응답할 확률,} \\ I_i^{NY}(B, B^L) &: \text{응답자 } i \text{가 (아니오, 예) 응답할 확률,} \\ I_i^{NN}(B, B^L) &: \text{응답자 } i \text{가 (아니오, 아니오) 응답할 확률,} \\ B^{H(L)} &: B \text{에 대해 (예)((아니오))라고 대답할 때 두 번째} \\ &\quad \text{제시금액 } (B^H = 2B, B^L = B/2)\end{aligned}\quad (13)$$

N 개의 독립적 관측치 표본에 대하여 로그-우도함수 형태의 반응 확률함수는 최대우도추정법에 의하여 모수들을 추정할 수 있으며 이에 따른 로그우도함수는 다음 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 각 지시변수는 응답자 i 가 상응하는 응답을 할 경우 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. 이후 이 함수값을 극대화함으로써 여러 계수의 값을 구할 수 있으며 계수 값들을 식 (10)에 대입하면 응답자 i 의 최대지불의사금액 (y^*)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}\ln L &= \sum_{i=1}^N d_i^{YY} \ln \left\{ e^{\alpha - \beta \ln(B_i^H)} \right\} \\ &\quad + d_i^{YN} \ln \left\{ e^{\alpha - \beta \ln(B_i)} - e^{\alpha - \beta \ln(B_i^H)} \right\} \\ &\quad + d_i^{NY} \ln \left\{ e^{\alpha - \beta \ln(B_i^L)} - e^{\alpha - \beta \ln(B_i)} \right\} \\ &\quad + d_i^{NN} \ln \left\{ 1 - e^{\alpha - \beta \ln(B_i^L)} \right\} \\ d_i^{YY} &: \text{응답자 } i \text{의 (예, 예) 응답에 대한 지시변수,} \\ d_i^{YN} &: \text{응답자 } i \text{의 (예, 아니오) 응답에 대한 지시변수,} \\ d_i^{NY} &: \text{응답자 } i \text{의 (아니오, 예) 응답에 대한 지시변수,} \\ d_i^{NN} &: \text{응답자 } i \text{의 (아니오, 아니오) 응답에 대한 지시변수.}\end{aligned}\quad (14)$$

사업별 최종모형 선정은 Log-likelihood와 AIC 및 BIC에 따라 가장 설명력이 높은 개인특성변수 조합의 모형으로 선정된다. 이때 비시장재효과의 연간편익은 다음과 같다. 평균지불의사금액은 식 (10)의 개인 지불의사금액의 평균값을 의미한다.

$$\begin{aligned}B_f^{non-market} &= r_f \times \overline{WTP_f^h} \times HH_f, \\ B_f^{non-market} &: \text{사업 } f \text{에 대한 연간 비시장재편익,} \\ r_f &: \text{사업 } f \text{에 대한 지불의사비용,} \\ \overline{WTP_f^h} &: \text{사업 } f \text{에 대한 가구당 평균지불의사금액,} \\ HH_f &: \text{사업 } f \text{설치 영향가구 수.}\end{aligned}\quad (15)$$

3. 경제성평가

각 사업의 경제성은 식 (16)과 같이 편익-비용비(B/C)와 순현재가치(NPV)를 통해 평가하기로 한다. 순현재가치가 0보다 크거나, 편익-비용비(B/C)가 1보다 클 경우 사업의 경제성은 확보된다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned}B/C_f &= \frac{PVB_f}{PVC_f}, NPV_f = PVB_f - PVC_f \\ PVB_f &: \text{사회적 할인율을 고려한 사업 } f \text{의 총편익,} \\ PVC_f &: \text{사회적 할인율을 고려한 사업 } f \text{의 총비용.}\end{aligned}\quad (16)$$

III. 경제성평가

사업별 시장재효과 원단위는 선행연구와 통계자료로부터 산정된다. 우선 시장재비용 중 설치비용 원단위는 <표 3>과 같이 각 연구들에서 제시한 사업별 비용원단위의 최댓값과 최솟값의 평균값을 적용한다. 구체적으로 말해 쿨루프 사업의 설치비용원단위는 47,800원/m², 옥상녹화의 설치비용은 201,600원/m²으로 나타났다. 수선·교체비용 원단위와 유지·보수비용 원단위는 각각 설치비용의 20%, 1%로 가정하였다. 한편 설치비용은 초기년도에만 발생하고 수선·교체비용은 5년마다, 유지·보수비용은 매년 발생한다고 가정하였다.

시장재비용은 도출된 시장재비용 원단위와 설치가능면적의 곱으로 나타난다. 설치가능면적은 앞서 언급하였듯이 국토교통과학기술진흥원(2019)의 산정결과를 사용하였으며 대상지 및 사업별 설치가능면적은 <표 4>와 같다. 잠실5단지지의 경우 옥상녹화사업이 가능한 면적이 없는 것으로 나타나 경제성 분석에서 제외되었다.

한편 시장재편익 및 비시장재편익 중 이산화탄소저감편익은 편익원단위와 기온저감량의 곱으로 나타난다. 각 편익의 원단위 산정 결과는 <부록 1>에 제시하였다. 설치가능면적과 마찬가지로 기온저감량은 국토교통과학기술진흥원(2019)의 산정결과를 사용하였다. 구체적인 대상지 및 사업별 기온저감량은 <표 5>와 같다. 설치가능면적과 기온저감량을 고려하여 산출된 연간시장재비용 및 시장재편익, 비시장재편익 중 이산화탄소저감편익은 <부록 2>와 같다.

비시장재효과의 가치화를 위한 지불의사금액 설문지는 한국개발연구원(2012)의 방법에 따라 구성하였다. 구체적으로 응답자들에게 도시열섬현상 저감정책안(사업목적, 사업개요, 투입비용, 사업의 효과, 설치면적, 기온저감량 등)에 대해 설명한 후 사업별 지불의사금액을 묻는 방식으로 전개한다.

지불의사금액 산정에 있어서 지불방법 및 초기 제시금액 선정

표 3. 설치비용(단위: 원/m²)

Table 3. Installation cost (unit: won/m²)

Divisions	Cool roof	Green roof
Installation cost	47,800	201,600
Evidences	- Max: 73,333 (Levinson et al., 2005) - Min: 6,111 (Levinson et al., 2005)	- Max: 741,024 (Yeo and Jung, 2013) - Min: 128,500 (Mankiewicz and McDonnell, 2006)

표 4. 사업별 설치가능면적 (단위: m²)

Table 4. Installation areas by policy (unit: m²)

Divisions	Seogyo-dong	Jangwi District#4	Jamsil 5th complex
Cool roof	134,617	65,443	40,440
Green roof	50,001	13,636	0

출처: 국토교통과학기술진흥원(2019)

Source: Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(2019)

표 5. 사업 시행 후 기온저감량 (단위: °C)

Table 5. Temperature change due to the policy (unit: °C)

Divisions	Seogyo-dong	Jangwi District#4	Jamsil 5th Complex
Cool roof	0.41	0.20	0.91
Green roof	0.43	0.28	-

출처: 국토교통과학기술진흥원(2019)

Source: Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(2019)

은 중요하다. 왜냐하면 지불방법 및 초기 지불의사금액은 응답자의 지불의사여부에 크게 영향을 미치기 때문이다. 이에 본 논문에서는 한국개발연구원(2012)의 가이드라인에 따라 지불방법은 가구별 추가적인 소득세로 설정하고 초기제시금액의 범위는 사전설문조사를 통해 결정하였다. 사전설문조사에서 각 사업의 주민쾌적성 향상효과에 대한 지불의사금액을 개방형으로 질문하였다. 제시금액 범위를 응답자들이 작성한 금액 가운데 0을 제외한 상태에서의 표본 WTP분포 중 15%에서 85% 범위로 적용하였다. 제시금액 구간의 수는 4개로 하고 각 사업별 제시금액 구간은 쿨루프 사업은 5,000원, 10,000원, 30,000원, 50,000원, 옥상녹화 사업은 10,000원, 15,000원, 30,000원, 50,000원으로 설정되었다.

대상지별 지불의사금액 설문조사 개요는 다음과 같다. 비시장재효과의 영향범위에 따라 각 대상지별 설문조사 모집단은 20대 이상 행정동 주민으로 한정하였다. 표본은 각 대상지별 120명으로 선정하였다. 설문조사는 대면조사방식으로 진행되었고 조사기간은 2019년 7월 26일부터 2019년 8월 8일까지 진행되었다. 유효부수는 서교동 109부, 장위동 110부, 잠실3동 112부였으며 각 대상지별 표본의 기초통계와 초기제시금액별 응답분포는 <부록 3>과 <부록 4>에 각각 제시하였다.

로짓모형을 이용하여 도출된 각 사업별 지불의사모형은 다음 <표 6>과 같다. 모형#1은 제시금액을, 모형#2는 제시금액과 함께 가장 설명력이 높은 개인특성변수 조합을 적용한 모형이다. 본 연구에서는 Log-likelihood와 AIC, BIC를 고려하여 모형#2를 최종 지불의사모형으로 선정하였다. 분석 결과 두 사업 모두 지

표 6. 사업별 지불의사모형 결과

Table 6. Results of willingness to pay models by policy

Divisions	Cool roof		Green roof	
	#1	#2	#1	#2
Constant	0.611***	0.408	1.102***	0.144
Bid	-0.033***	-0.034***	-0.034***	-0.035***
Gender				
Age				
Education		0.251*		
Income				0.327***
Residence		-0.312**		
Log-likelihood	-425.907	-421.304	-311.690	-307.050
A.I.C	855.814	850.608	627.372	620.100
B.I.C	863.418	865.816	634.150	630.267

Gender: 0. female 1. male

Age: 1. 20s 2. 30s 3. 40s 4. 50s 5. 60s and older

Education: 1. middle school graduate 2. high school graduate 3. bachelor's degree 4. advanced degree

Income: 1. under one million won 2. 1-3 million won 3. 3-5 million won 4. 5-7 million won 5. 7-9 million won 6. more than 9 million won

Residence: 0. my own house 1. other types

* p<0.01, ** p<0.05, *** p<0.001

불의사에 제시금액이 음의 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 제시금액이 높을수록 지불의사가 낮아짐을 의미한다. 개인특성변수는 쿨루프 사업은 학력이 양의 영향, 주거형태가 음의 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 옥상녹화 사업의 경우 소득이 지불의사에 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

지불의사모형에서 산정된 계수를 식 (10)에 대입함으로써 개인별 지불의사금액이 도출된다. 도출된 대상지별, 사업별 평균 지불의사금액을 도출하면 <표 7>과 같다. 평균적으로 쿨루프 사업 19,069원, 옥상녹화 사업 32,827원으로 분석되었다. 어메니티 향상효과를 가진 옥상녹화가 그렇지 않은 쿨루프에 비해 약 1.72배 더 효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 도시열섬현상 저감에 따른 주민 열쾌적성 향상효과뿐만 아니라 사업의 부수적인 어메니티 향상효과도 주민 만족도에 영향을 미치며 향후 사업 선택에 있어서 이러한 비시장재효과가 고려되어야 함을 시사한다. 대상지 평

표 7. 연간 지불의사금액 및 비율 (단위: 원/년)

Table 7. Values and rates of willingness to pay per year (unit: won/year)

Divisions	Seogyo-dong	Jangwi District#4	Jamsil 5th Complex	Average
Cool roof	18,423 (68.8%)	19,507 (66.4%)	19,278 (67.9%)	19,069 (67.9%)
Green roof	33,086 (79.8%)	32,568 (70.0%)	-	32,827 (74.8%)

표 9. 경제성분석 결과 (단위: 백만 원)

Table 9. Cost-benefit analysis results (Unit: million won)

Divisions		Item	Seogyo-dong		Jangwi District#4		Jamsil 5th Complex
			Cool roof	Green roof	Cool roof	Green roof	Cool roof
Costs	Market effects	Installation costs	6,441	10,078	3,131	2,748	1,935
		Repair & Replacement costs	3,492	5,463	1,697	1,490	1,049
		Maintenance costs	1,032	1,615	502	440	310
	Non-market effects	External costs ¹⁾ - Eye strain	-	-	-	-	-
	Total cost		10,964	17,155	5,330	4,679	3,294
Benefits	Market effects	Energy (Electricity) reduction	2,272	2,383	469	657	2,248
		Regional economic vitalization ²⁾	-	-	-	-	-
		Health promotion	2	2	2	3	6
	Non-market effects	CO ₂ reduction	191	201	39	55	189
		Amenity improvement - Thermal comfort improvement - Ancillary amenity improvement	2,963	6,173	2,806	4,938	1,150
		Total benefit		5,428	8,759	3,316	5,653
	B/C		0.50	0.51	0.62	1.21	1.09
NPV		-5,536	-8,396	-2,014	976	301	

¹⁾ External costs are included in the amenity improvement benefit

²⁾ Regional economic vitalization is the transfer payment (TP). Hence, it is not considered in the analysis

균 지불의사비율은 쿨루프가 67.9%, 옥상녹화가 74.8%로 나타났다. 지불의사금액과 마찬가지로 지불의사비율측면에서도 쿨루프 사업보다 옥상녹화 사업을 선호하는 것으로 나타났다.

산정된 지불의사금액과 지불의사비율, 가구수를 식 (15)에 대입하면 <표 8>과 같이 연간 비시장재편익(2018년 기준)이 도출된다.²⁾ 서교동의 경우 옥상녹화 사업이 3억 7천만 원으로 높았고, 쿨루프 사업은 1억 8천만 원으로 상대적으로 낮았다. 장위4구역의 경우 옥상녹화 사업은 약 3억 원, 쿨루프는 1억 7천만 원으로 분석되었다. 잠실5단지 내 쿨루프 사업의 연간 비시장재편익은 1억 5천만 원으로 산정되었다.

앞서 추정된 비용과 편익을 바탕으로 사회적 할인율을 고려한 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 경제성분석 결과는 <표 9>와 같다. 서교동의 경우, 비시장재효과를 경제성분석에 반영하였을 때 쿨루프 사업의 편익-비용비는 0.50, 옥상녹화 사업은 0.51로 분석되었다(순현재가치의 경우 쿨루프 사업: -55억 원, 옥상녹화 사업 -84억 원). 비시장재효과는 쿨루프사업이 29억 원, 옥상녹화

표 8. 연간 비시장재효과 (단위: 백만원)

Table 8. Annual non-market effects (Unit: million won)

Divisions	Seogyo-dong	Jangwi District#4	Jamsil 5th Complex	Period
Cool roof	176	166	146	Every year
Green roof	366	293	-	

사업이 62억 원으로 각 사업의 경제성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 여전히 두 사업 모두 경제성은 없는 것으로 나타났다.

장위4구역의 경우 비시장재효과를 반영하였을 때 쿨루프 사업의 편익-비용비가 0.62, 옥상녹화 사업은 1.21로 분석되었다. 순현재가치는 쿨루프 사업이 약 -20억 원, 옥상녹화 사업은 약 10억 원으로 나타났다. 서교동과 마찬가지로 비시장재효과를 고려하였을 때 두 사업 모두 경제성이 향상되었고, 특히 옥상녹화 사업의 경우 경제성이 확보되었다.

잠실5단지의 경우 쿨루프 사업의 편익-비용비는 1.09, 순현재가치는 3억 원으로 나타났다. 타 대상지의 쿨루프 사업과 달리 잠실5단지는 비시장재효과를 고려하였을 때 경제성이 있는 것으로 나타났다. 이는 비시장재효과의 지역적 차이에서 비롯되기도 하는 잠실5단지 내 쿨루프 사업의 기온저감량이 0.91℃로 타 대상지(서교동: 0.41℃, 장위4구역: 0.20℃)보다 높은데서 기인한 것으로 판단된다.

종합하면 세 대상지 모두 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 편익 효과 중 주민 쾌적성향상효과가 타시장재편익보다 높은 비율을 차지하는 것으로 분석되었다. 특히, 쿨루프 사업보다는 옥상녹화 사업의 비시장재효과가 월등하게 높아 장위4구역의 경우 경제성이 확보되었다. 반면 쿨루프 사업의 경우 주민 쾌적성향상효과가 옥상녹화 사업보다 작아 경제성에 미치는 영향은 상대적으로 낮았다. 이는 옥상녹화 사업의 기온저감량 대비 지불의사금액이 쿨루프 사업보다 높게 나타난 데서 기인한다. 이러한 결과는 다른 지역적 특징을 가진 서교동에서도 찾아볼 수 있었다. 뿐만 아니라 지역 간 경제성 차이도 기온저감량 대비 지불의사금액 차이에서 기인한다고 할 수 있다. 두 지역의 결과는 사업결정 시 주민들의 옥상녹화 사업에 대한 어메니티효과가 사회적 효용에 미치는 영향을 반드시 고려해야 함을 시사한다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

본 논문은 건조환경이 다른 서울의 3개 대상지에 대하여 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 경제성 분석을 실시하였다. 이때 비용과 편익은 시장재효과와 비시장재효과(열쾌적성 향상효과, 어메니티 향상효과, 쿨루프의 외부비용)로 구분하여 분석하였다. 경제성 분석 결과 비시장재효과를 고려하였을 때 쿨루프 사업보다 옥상녹화 사업의 경제성이 더 높은 것으로 분석되었다.

본 논문은 선행연구의 한계를 보완하기 위해 쿨루프 사업과 옥상녹화 사업의 도시열섬현상 저감에 따른 주민 열쾌적성 향상효과를 정량화하였다. 이를 바탕으로 열쾌적성 향상효과가 각 사업의 경제성에 미치는 영향을 실증했다는 측면에서 의의가 있다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 옥상녹화 사업의 어메니티 향상효과도 사회적 후생에 크게 영향을 주는 것을 확인하였다. 이러한 분석

결과는 서울시 쿨루프 및 옥상녹화 지원사업 확대에 대한 근거로써 작용할 수 있을 것으로 기대된다. 구체적으로 말해 향후 민간 부문에 대한 지원보조금을 확대하고 시민들의 사업에 대한 관심을 증대하기 위한 수단으로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 주민들의 기온저감량 대비 지불의사금액을 향상하고 이를 바탕으로 경제성을 확보하기 위해서 사업홍보 및 기술연구에 대해 지속적인 지원이 요구된다.

본 논문의 결과를 바탕으로 향후 연구 방향을 제시하면 다음과 같다. 향후 사업 효과의 공간적 영향범위에 대한 보다 더 정확한 분석이 필요하다. 비시장재효과는 지불의사금액뿐만 아니라 영향범위 내 가구 수에도 영향을 받는다. 본 논문은 대상지가 속해 있는 행정동을 영향권으로 설정하였으나, 이에 대한 근거는 엄밀히 말해 미약하다고 할 수 있다. 향후 공간범위 결정에 대한 모형 개발 등 보다 더 구체적인 효과의 영향범위에 대한 연구가 수행되기를 기대한다.

주1. 응답자에게 첫 번째 제시금액을 제시한 후 응답자의 대답에 따라 추가로 금액을 제시하여 그에 대한 응답을 자료화하는 방법으로 단일양분선택형 질문법보다 자료의 효율성을 높일 수 있다는 장점이 있다 (주수현·정성호, 2010).

주2. 분석기간(2018~2047) 동안 연간편익을 산정하기 위해서는 동기간의 행정동별 장래가구수가 예측되어야 한다. 본 연구에서는 기준년도(2018년) 행정동별 가구수에 통계청(2017)의 서울시가구 연간변화율을 적용하여 추계하였다.

인용문헌

References

1. 국토교통과학기술진흥원, 2019. 「기후변화 적응형 도시열환경 설계시스템 기술 개발 5차년도 연차보고서」, 경기. Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2019. *Development of Urban Thermal Environment Simulation system for Climate Change Adaptation 5th Year Annual Report*, Gyeonggi.
2. 국토해양부, 2009. 「기후변화에 대비한 도시계획적 대응방안 연구」, 경기. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009. *A Study on Urban Planning Countermeasures for Climate Change Adaptation*, Gyeonggi.
3. 권용석, 2018. “도시구조적 차원에서 바라본 대구 대도시 유역의 폭염 가중원인 추정과 해결과제”, 「국토연구」, 98: 23-35. Kwon, Y.S., 2018. “Estimation and Countermeasure of the Heat Wave Cause of Daegu Metropolitan Basin from the Urban Structural Dimension”, *The Korea Spatial Planning Review*, 98: 23-35.
4. 기상청, 2018. “2018년과 1994년 폭염 비교”, 서울. Korea Meteorological Administration, 2018. “Comparison of Heat Wave in 2018 and 1994”, Seoul.
5. 김정호·윤용한, 2011. “옥상녹화시스템 유형별 건물에너지 절감 및 경제성 분석”, 「서울도시연구」, 12(2): 125-140. Kim, J.H. and Yoon, Y.H., 2011. “Economic Analysis and Energy Re-

- duction by the Types of the Green Roof", *Seoul Studies*, 12(2): 125-140.
6. 김준우·엄정섭, 2012. "설비 투자비용의 관점에서 쿨루프와 옥상녹화의 비교 평가: 경북대학교 캠퍼스 사례를 중심으로", 「환경영향평가」, 21(6): 927-939.
Kim, J.W. and Um, J.S., 2012. "Comparative Evaluation between Cool Roof and Green Roof in Terms of Installation Cost: a Case Study of KNU Campus". *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(6): 927-939.
 7. 김현욱·염종민, 2012. "도시지역의 토지피복유형이 지표면온도에 미치는 영향: 경기도 일산 신도시를 중심으로", 「대한원격탐사학회지」, 28(2): 203-214.
Kim, H.O. and Yeom, J.M., 2012. "Effect of the Urban Land Cover Types on the Surface Temperature: Case Study of Ilsan New City". *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(2): 203-214.
 8. 김홍배, 2008. 「정책평가기법: 비용·편익분석론」, 파주: 나남.
Kim, H.B., 2008. *Public Policy Analysis and Evaluation Method: A Cost-benefit Analysis*, Paju: Nanam.
 9. 김홍순·최재연·신은하, 2014. "옥상녹화사업의 종류에 따른 경제성 분석", 「대한건축학회 논문집-계획계」, 30(10): 159-167.
Kim, H.S., Choi, J.Y., and Shin, E.H., 2014. "Economic Analysis Based on the Type of Green Roof Initiatives - The Case of Jung-gu, Seoul -". *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 30(10): 159-167.
 10. 김희주·오규식·이승재, 2018. "중규모 기상모델(WRF-ARW)을 활용한 서울시 옥상녹화와 쿨루프의 기온저감 효과 분석", 「서울도시연구」, 19(2): 39-57.
Kim, H.J., Oh, K.S., and Lee, S.J., 2018. "The Effects of Green and Cool Roofs on Temperature Reduction in Seoul Using a Mesoscale Meteorological Model (WRF-ARW)", *Seoul Studies*, 19(2): 39-57.
 11. 여규동·정영훈, 2013. "도시지역의 옥상녹화에 따른 유출저감효과 분석과 비용 산정", 「서울도시연구」, 14(2): 161-177.
Yeo, K.D. and Jung, Y.H., 2013. "An Analysis of Effect of Green Roofs in Urbanized Areas on Runoff Alleviation and Cost Estimation", *Seoul Studies*, 14(2): 161-177.
 12. 오규식·홍재주, 2005. "도시공간 구성요소와 도시열섬현상의 관련성 연구", 「한국도시계획학회지 도시설계」, 6(1): 47-63.
Oh, K.S. and Hong, J.J., 2005. "The Relationship between Urban Spatial Elements and the Urban Heat Island Effect", *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 6(1): 47-63.
 13. 이주희·임엽·손민수·김홍석, 2010. "조건부가치추정법을 이용한 옥상공원의 경제적 가치 추정", 「국토계획」, 45(6): 137-148.
Lee, J.H., Lim, U., Son, M.S., and Kim, H.S., 2010. "Economic Valuation of Green Roof Systems Using Contingent Valuation Method", *Journal of Korea Planning Association*, 45(6): 137-148.
 14. 조항문·이운혜, 2018. "서울시 폭염 대응력 향상 방안", 「서울연구원 정책리포트」, 257: 1-29.
Cho, H.M. and Lee, Y.H., 2018. "Measures to Improve Seoul's Responsiveness to Heat Wave", *Seoul Institute Policy Report*, 257: 1-29.
 15. 주수현·정성호, 2010. "이중 양분형 CVM을 통한 부산 불꽃축제에 대한 편익 가치 추정", 「지역과 커뮤니케이션」, 14(2): 185-204.
Joo, S.H. and Cheong, S.H., 2010. "Cost-Benefit Analysis for Busan Fireworks Festival Using Double-Bounded Dichotomous Choice CVM Method", *Locality & Communication*, 14(2): 185-204.
 16. 통계청, 2017. "장래가구추계 (시도편): 2015~2045년", 대전.
Statistics Korea, 2017. "Household Projection (cities and provinces): 2015~2045", Daejeon.
 17. 한국개발연구원, 2012. 「예비타당성조사를 위한 CVM 분석지침 개선 연구」, 세종.
Korea Development Institute, 2012. *Improvement of CVM Analysis Guidelines for Preliminary Feasibility Analysis*, Sejong.
 18. Akbari, H., 2005. "Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation (No. LBNL-58285)", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley: CA, USA.
 19. Berto, R., Stival, C.A., and Rosato, P., 2018. "Enhancing the Environmental Performance of Industrial Settlements: An Economic Evaluation of Extensive Green Roof Competitiveness", *Building and Environment*, 127: 58-68.
 20. Berto, R., Stival, C.A., and Rosato, P., 2020. "The Valuation of Public and Private Benefits of Green Roof Retrofit in Different Climate Conditions." in *Values and Functions for Future Cities*, edited by Mondini, G., Oppio, A., Stanghellini, S., Bottero, M., Abastante, F., 145-166, Springer: Cham, Switzerland.
 22. Cai, L., Feng, X.P., Yu, J.Y., Xiang, Q.C., and Chen, R., 2019. "Reduction in Carbon Dioxide Emission and Energy Savings Obtained by Using a Green Roof", *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 2432-2445.
 22. Coutts, A.M., Daly, E., Beringer, J., and Tapper, N.J., 2013. "Assessing Practical Measures to Reduce Urban Heat: Green and Cool Roofs", *Building and Environment*, 70: 266-276.
 23. Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., and Evola, G., 2015. "A Multi-criteria Methodology for Comparing the Energy and Environmental Behavior of Cool, Green and Traditional Roofs", *Building and Environment*, 90: 71-81.
 24. Herrera-Gomez, S.S., Quevedo-Nolasco, A., and Pérez-Urrestarazu, L., 2017. "The Role of Green Roofs in Climate Change Mitigation. A Case Study in Seville (Spain)", *Building and Environment*, 123: 575-584.
 25. Imran, H.M., Kala, J., Ng, A.W.M., and Muthukumaran, S., 2018. "Effectiveness of Green and Cool Roofs in Mitigating Urban Heat Island Effects during a Heatwave Event in the City of Melbourne in Southeast Australia", *Journal of Cleaner Production*, 197(Part 1): 393-405.
 26. Karlsson, M., Alfredsson, E., and Westling, N., 2020. "Climate Policy Co-benefits: A Review", *Climate Policy*, 20(3): 292-316.
 27. Kim, D.H., Ahn, B.I., and Kim, E.G., 2016. "Metropolitan Residents' Preferences and Willingness to Pay for a Life Zone Forest for Mitigating Heat Island Effects during Summer Season in Korea", *Sustainability*, 8(11): 1155.
 28. Kjellstrom, T., Kovats, R.S., Lloyd, S.J., Holt, T., and Tol, R.S.J., 2009. "The Direct Impact of Climate Change on Regional Labor Productivity", *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64(4): 217-227.
 29. Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., and Bretz, S., 2005. "Inclusion of Cool Roofs in Nonresidential Title 24 Pre-

- scriptive Requirements”, *Energy Policy*, 33(2): 151-170.
30. Loibl, W., Tötzer, T., Köstl, M., Naberneegg, S., and Steininger, K.W., 2015. “Cities and Urban Green,” in *Economic Evaluation of Climate Change Impacts*, 323-347. Springer, Cham.
31. Mankiewicz, P.S. and McDonnell, T., 2006. “Sustainable Green Roof Design: Optimizing Water Budgets through Wastes-into-resources Technologies in the Bronx”, in *Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Boston, MA.
32. Oke, T.R., 1982. “The Energetic Basis of the Urban Heat Island”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455): 1-24.
33. Taha, H., 1997. “Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat”, *Energy and Buildings*, 25(2): 99-103.
34. Yang, J., Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., and Lee, S.E., 2018. “Green and Cool Roofs’ Urban Heat Island Mitigation Potential in Tropical Climate”, *Solar Energy*, 173: 597-609.
35. Zhang, L., Fukuda, H., and Liu, Z., 2019a. “Households’ Willingness to Pay for Green Roof for Mitigating Heat Island Effects in Beijing (China)”, *Building and Environment*, 150: 13-20.
36. Zhang, L., Fukuda, H., and Liu, Z., 2019b. “The Value of Cool Roof as a Strategy to Mitigate Urban Heat Island Effect: A Contingent Valuation Approach”, *Journal of Cleaner Production*, 228: 770-777.
37. 한국거래소 배출권시장 정보플랫폼, “유럽 탄소배출권 가격”, 2018.09.30. 읽음. <http://ets.krx.co.kr>
Korea Exchange ETS Market Information Platform, “European Carbon Credit Prices”, Accessed September 30, 2018. <http://ets.krx.co.kr>
38. 한국에너지공단, “이산화탄소 배출량 계산기”, 2019.08.05. 읽음. <http://www.energy.or.kr>
Korea Energy Agency, “CO₂ Emission Calculator”, Accessed August 5, 2019. <http://www.energy.or.kr>
39. 한국전력 사이버지점, “전기요금표”, 2019.08.05. 읽음. <http://cyber.kepco.co.kr/>
Korea Electric Power Corporation Cyber Branch, “Electric Rates Table” Accessed August 5, 2019. <http://cyber.kepco.co.kr/>

Date Received 2020-06-28
Date Reviewed 2020-07-23
Date Accepted 2020-07-23
Date Revised 2020-09-09
Final Received 2020-09-09

부록 Appendix

부록 1. 시장재편익 및 이산화탄소저감편익 원단위

Appendix 1. Units of market benefits and CO₂ reduction benefit

Divisions	Items	Units	Evidences
Energy (Electricity) reduction	Energy reduction rate per climate mitigation	3 (%/°C)	Akbari (2005), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009)
	Energy price	111,160 (won/kWh)	Korea Electric Power Corporation Cyber Branch (2018)
CO ₂ Reduction	Energy Reduction Rate per Climate Mitigation	3 (%/°C)	Same as Energy (Electricity) Reduction
	CO ₂ Reduction per Energy Reduction	0.4594 (tCO ₂ /MWh)	Korea Energy Agency (2019)
	CO ₂ Price	20,374 (won/tCO ₂)	Korea Exchange ETS Market Information Platform (2018)

부록 2. 연간시장재효과 및 이산화탄소저감편익 (단위: 백만원)

Appendix 2. Annual market effects and CO₂ reduction benefit (Unit: million won)

Divisions	Effects		Seogyo-dong	Jangwi District#4	Jamsil 5th Complex	Period
Cool roof	Market costs	Installation costs	6,441	3,131	1,935	Once at initial year
		Repair & Replacement costs	1,288	626	387	Five year period
		Maintenance costs	64	31	19	Every year
	Market benefits	Energy (Electricity) reduction	78	23	102	Every year
		Health Promotion	0.11	0.11	0.35	
	Non-market benefit	CO ₂ reduction	7	2	9	
Green roof	Market costs	Installation costs	10,077	2,748	-	Once at initial year
		Repair & Replacement costs	2,016	550	-	Five year period
		Maintenance costs	101	27	-	Every year
	Market benefits	Energy (Electricity) reduction	82	32	-	Every year
		Health promotion	0.12	0.15	-	
	Non-market benefit	CO ₂ reduction	7	3	-	

부록 3. 지불의사금액 설문조사 기초통계

Appendix 3. Basic statistics of willingness to pay

Divisions		Seogyo-dong		Jangwi District#4		Jamsil 5th Complex	
		person	rate (%)	person	rate (%)	person	rate (%)
Valid Samples		109	-	110	-	112	-
Gender	Male	55	50.5	63	57.3	63	56.3
	Female	54	49.5	47	42.7	49	43.8
Age	20s	21	19.3	22	20.0	19	17.0
	30s	32	29.4	39	35.5	22	19.6
	40s	19	17.4	25	22.7	19	17.0
	50s	26	23.9	18	16.4	33	29.5
	60s and older	11	10.1	6	5.5	19	17.0
Education	Middle school graduate	2	1.8	1	0.9	1	0.9
	High school graduate	34	31.2	22	20.0	36	32.1
	Bachelor's degree	64	58.7	77	70.0	68	60.7
	Advanced degree	9	8.3	10	9.1	7	6.3
Income	Under one million won	9	8.3	7	6.4	4	3.6
	1-3 million won	23	21.1	31	28.2	24	21.4
	3-5 million won	36	33.0	39	35.5	31	27.7
	5-7 million won	32	29.4	20	18.2	12	10.7
	7-9 million won	35	32.1	9	8.2	19	17.0
	More than 9 million won	2	1.8	4	3.6	22	19.6
Residence	My own house	63	57.8	62	56.4	72	64.3
	Other types	46	42.2	48	43.6	40	35.7

부록 4. 초기제시금액별 설문응답분포

Appendix 4. Response distribution by Bid

Regions	Divisions	Bids (won)	Responses (person)				No willingness	Total
			Yes-Yes	Yes-No	No-Yes	No-No		
Seogyo-dong	Cool roof	5,000	13	2	1	9	9	25
		10,000	8	5	4	11	11	28
		30,000	4	6	7	11	8	28
		50,000	7	6	4	11	5	28
		Total	32	19	16	42	33	109
	Green roof	10,000	12	7	1	5	5	25
		15,000	9	4	9	6	6	28
		30,000	7	5	6	10	9	28
		50,000	7	9	6	6	2	28
		Total	35	25	22	27	22	109
Jangwi District#4	Cool roof	5,000	18	1	0	7	7	26
		10,000	14	5	1	10	9	30
		30,000	4	6	3	15	14	28
		50,000	6	8	2	10	7	26
		Total	42	20	6	42	37	110
	Green roof	10,000	12	8	0	6	4	26
		15,000	13	2	6	9	9	30
		30,000	7	4	4	13	13	28
		50,000	6	7	4	9	7	26
		Total	38	21	14	37	33	110
Jamsil 5 th Complex	Cool roof	5,000	10	7	0	12	12	29
		10,000	4	4	5	15	14	28
		30,000	4	10	2	11	7	27
		50,000	2	5	4	17	13	28
		Total	20	26	11	55	46	112