

주택 라돈 저감의 건강 효과와 사회적 편익

김용주*

요약 : 라돈은 폐암사망 위험을 일으키는 방사성 가스이다. 본 논문은 조건부가치측정법(CVM)을 이용하여 우리나라 주택에서의 라돈 노출로 인한 사망자의 통계적 생명가치(VSL)를 20억 5,373만 원으로 추정하였다. 2020년의 경우, 주택 라돈으로 인한 사망자 수는 2,330명, 그 사회적 비용은 4조 7,836억 원으로 추정하였다. 주택에 대한 국가 라돈 농도 규제기준을 200Bq/m³로 설정하면 691명의 사망자 수가 감소하여 1조 4,191억 원의 사회적 편익이 발생하는 것으로 나타났다. 본 논문은 주택 라돈 노출의 원천과 특징 및 건강위해성(health risk)을 상세히 논하고 주택 라돈 저감을 위한 정책 예산의 획기적인 증액이 중요함을 강조하였다.

주제어 : 라돈, 폐암, CVM, VSL, 사회적 편익

JEL 분류 : I18, Q51, Q53

접수일(2022년 11월 26일), 게재확정일(2022년 12월 3일)

* 서울디지털대학교 경영학과 교수, 교신저자(e-mail: ykim505050@gmail.com)

Health Effects and Social Benefit of Residential Radon Reduction

Yongjoo Kim*

ABSTRACT : Radon is a radioactive gas that causes lung cancer deaths. The contingent valuation method (CVM) is used to estimate the value of a statistical life(VSL) of 2.054 billion won for the death due to residential radon in Korea. Residential radon is assumed to have caused 2,330 deaths in 2020, of which the estimated social cost is 4.78 trillion won. When a national compulsory standard of 200Bq/m³ is set for residential radon concentration, the number of lives saved is estimated to be 691, leading to a social benefit of 1.42 billion won. This study reports the origin, characteristics and health risk of residential radon, and emphasizes the importance of a dramatic increase in the budget for residential radon reduction policies.

Keywords : Radon, Lung Cancer, CVM, VSL, Social Benefit

Received: November 26, 2022. Accepted: December 3, 2022.

* Professor, Department of Business Administration, Seoul Digital University, Corresponding author (e-mail: yjkim505050@gmail.com)

1. 서론

라돈(Rn)은 폐암을 일으키는 무색·무미·무취의 방사성 가스(radioactive gas)이다. 라돈은 모든 토양과 공기 중에 존재하지만 실외에서는 라돈이 공기 중에 넓게 퍼지므로 폐암 위험이 매우 낮다. 그러나 실내나 광산 등 밀폐된 공간에서는 라돈의 농도가 축적되어 폐암 위험이 높아진다. 왜냐하면 밀폐된 공간에서는 라돈이 공기보다 무거워 지상에 고이는 성질이 있기 때문이다. 주택 내에 존재하는 라돈(이하 ‘주택라돈’)은 흡연 다음으로 많은 폐암 사망자를 발생시키는데, 대부분은 사람들이 많이 거주하는 낮은 농도의 주택에서 발생한다. 특히 흡연자의 사망위험은 평생 비흡연자보다 훨씬 높은 특징이 있다.

주택라돈의 폐암 위험이 널리 알려진 것은 비교적 최근인 1980년대이지만, 주택라돈은 현재 세계 각국의 주요 환경정책 대상이다. 세계보건기구(WHO, 2022a)에 따르면, 2021년 2월 현재 56개국이 WHO의 라돈조사에 응하였으며, 그중 우리나라를 포함한 대부분은 주택라돈 등에 대해 자체적인 권고기준을 설정하였고, 44%는 국가 라돈대응계획(radon action plan)을 수립하였다. 또 우리나라를 포함한 39%는 신축 주택 등에 대한 라돈농도 규제 법안을 마련하였다.

주택라돈에 대한 세계 각국의 정책적 관심이 비교적 짧은 기간에 고조된 것은 다음과 같은 주택라돈 위험의 특징들 때문이다. 첫째, 주택라돈의 부정적 영향은 폐암뿐이며 흡연자의 위험이 비흡연자보다 훨씬 높다는 사실이 견고히 입증되어 있다. 둘째, 주택은 사람들이 많은 시간을 보내는 곳이므로 주택라돈을 저감시키지 않고서는 라돈 위험을 크게 낮출 수 없다. 셋째, 라돈 위험은 대기오염 위험처럼 피할 수 없으므로 주택라돈 저감은 공공재적 성격이 강하다. 끝으로, 다행히도 주택라돈 농도는 측정하기 쉽고 비교적 적은 비용으로 저감할 수 있어서 다른 많은 환경오염 문제들보다 대처가 용이하다.

이러한 주택라돈의 특징들 때문에 미국, 영국 등 주요 선진국 정부들은 주택라돈 저감에 힘쓰고 있으며 국민들도 대개는 주택라돈의 위험을 인지하고 있다. 예컨대, 미국환경보호청(USEPA, 2016)과 영국보건안전청(UKHSa, 2022)을 보면, 자국 내의 많은 주택들이 라돈농도를 측정하도록 하고 주택 매매 시에 주택라돈 농도에 대한 정보를 참고하도록 하는 데 지속적으로 관여해 왔음을 알 수 있다.

우리나라의 주택라돈 정책의 강도는 이보다 약한 편으로 생각된다. 특히 전국 주택의

라돈 측정 비중은 낮은 편이다. 그렇다고 하여 국민의 자발적 저감 노력을 기대하기도 어렵다. 주택라돈 위험은 인위적(human origin)이 아닌 자연발생적(natural origin) 위험이어서 위험인식(risk perception)이 낮을 뿐만 아니라(Covello and Sandman, 2001), 라돈 가스가 무색·무취·무미하므로 고농도에 장기간 노출되어도 이를 인지하지 못하기 때문이다.

그러면 정부가 주택라돈 저감 책임을 전적으로 지는 것이 합당한가? 그렇지도 않다. 주택라돈은 자연에서 끊임없이 배출되기 때문에 결국 국민의 자발적 저감 노력에 기대는 것이 효과적인 수밖에 없다. 정부와 지자체 등 공공부문의 역할은 국민의 자발적 저감 노력을 이끌어 내기 위해 지금보다 훨씬 많은 노력을 지속적으로 기울이는 일이다. 우리 정부는 이미 주택라돈 저감을 위한 권고기준을 마련하였으며 신축 주택에 대해 라돈농도를 규제하는 제도를 운영하고 있다. 이는 세계적으로 뒤처지지 않는 수준이다. 그러나 우리 정부의 주택라돈 정책 강도가 미국, 영국 등에 비해 다소 약하게 느껴지는 것도 사실이다.

국민의 자발적 주택라돈 저감 노력을 이끌어 내는 가장 효과적인 방법은 주택라돈 측정수를 늘리는 일일 것이다. 그러나 우리나라의 주택라돈 농도 측정수는 주요국 수준에는 훨씬 못 미친다. 정부가 제도 보완 노력은 지속적으로 하고 있으나 그 자체로 주택라돈 측정수의 획기적인 증가를 이끌어 내기에는 한계가 있다.

주택라돈에 대한 국민의 낮은 위험인식과 저감노력 부족, 그리고 주택라돈 측정수를 획기적으로 늘리지 못하는 정부 정책의 근본적인 한계점은 무엇보다 정부의 주택라돈 관련 예산 부족에 기인하는 바가 큰 것으로 보인다. 주택라돈 위험에 대한 보다 지속적이고도 강력한 홍보 강화, 우리나라 실정에 맞는 주택라돈의 건강위해성(health risk) 평가, 보다 촘촘한 전국라돈지도(national radon map)의 제작, 라돈 전문인력의 충원, 무료 주택라돈 측정 및 컨설팅 지원 등은 모두 예산을 필요로 한다. 따라서 주택라돈 측정수의 증대는 관련 예산의 획기적인 증액에서 한계점 극복의 실마리를 찾을 수 있을 것이다.

그러면 주택라돈 관련 예산을 획기적으로 증대시키면 그 이상으로 사회적 편익이 발생할 것인가? 본 논문의 목적 중 하나는 주택라돈 저감의 사회적 편익을 추정함으로써 이러한 물음에 답할 수 있는 논리적 근거를 제시하는 데 있다. 이는 주택라돈 저감 정책 예산의 증액이 필요한지에 대한 이론적 근거를 제공할 것이다. 본 논문의 두 번째 목적은 주택라돈 노출의 원천과 특징, 특히 건강위해성을 비교적 자세히 소개함으로써 주택라

돈 위험 인식의 제고와 주택라돈 저감 노력의 활성화를 통한 폐암 위험의 감소에 기여하는 데 있다. 본 논문의 마지막 목적은 주택라돈에 관한 비용편익분석 연구에 기여하는 것이다. 우리나라는 물론 세계적으로도 비시장가치 평가 방법론(non-market valuation method)을 이용해 주택라돈 저감의 사회적 편익과 비용을 추정할 사례는 찾기가 쉽지 않다.

다음 장에서는 주택라돈의 원천과 건강위해 경로, 국내외의 건강위해성 연구, 그리고 주택라돈 저감 가치 평가 사례를 제시한다(II). 그 후 주택라돈 폐암 위험 저감에 대한 지불의사액(willingness to pay, WTP)의 도출에 필요한 계량모형을 설정하고 분석자료를 수집하며 계량모형을 추정한다(III). 그런 다음 조건부가치추정법(contingent valuation study, CVM)을 이용하여 통계적 생명가치(value of a statistical life, VSL)를 도출하고 주택라돈 폐암사망의 사회적 비용과 주택라돈 저감의 사회적 편익을 화폐가치로 각각 추정한다. 결론은 요약 및 시사점으로 맺는다(IV).

II. 주택 라돈 저감의 건강 효과와 평가 사례

1. 주택라돈의 원천과 건강위해 경로¹⁾

모든 땅과 물에는 우라늄(U)과 토륨(Th)이 존재한다. 자연 상태의 불안정한 우라늄과 토륨은 방사선을 방출하는 방사성 붕괴(radioactive decay)를 통해 더 안정적인 방사성 물질로 변하며, 이 물질 또한 방사성 붕괴 과정을 거친다. 이 과정은 안정적인 납(Pb)이 될 때까지 연쇄적으로 발생하는데, 라돈은 이 과정 중에 생성되는 방사성 물질이다.²⁾

우라늄과 토륨이 모든 땅과 물에 존재하므로 라돈도 모든 토양에 존재한다. 그런데 라돈은 가스 형태를 띠므로 일부가 토양 속에서 새어 나와 주택을 포함한 모든 공간의 공기 중으로 퍼진다. 라돈가스가 실외에서는 대기 중으로 퍼져 농도가 낮지만, 주택이나 탄광 등 밀폐된 공간에서는 공기보다 무거워 정체되고 농도가 축적된다.³⁾ 특히 주택은 사람들이 많은 시간을 보내는 곳이므로 주택에서의 라돈 위험은 가중된다.

1) 전반적인 내용은 미국국립과학아카데미(NAS, 1999)의 BEIR VI 보고서를 참조하였다.

2) 자연 상태에서 존재하는 라돈의 3개 동위원소인 ²²²Rn, ²¹⁹Rn 및 ²²⁰Rn은 각각 ²³⁸U, ²³⁵U 및 ²³²Th의 붕괴 과정에서 생성된다.

3) 라돈은 건축자재나 지하수를 통해 인체에 유입되기도 한다.

주태라돈에 의한 폐암 위험은 대부분 ^{222}Rn 과 그 자핵종(radon progeny)들⁴⁾에 의해 발생한다. 이들이 호흡을 통해 폐에 흡입되면, 폐에 흡착하여 알파입자(α -particle) 등의 방사선을 계속 방출함으로써 폐세포의 DNA를 손상시켜 폐암을 발생시킨다. 특히 라돈 가스 자체보다는 그 자핵종들에 의한 폐암사망 위험이 더 높는데, 그 이유는 라돈 자핵종들이 고체 형태를 띠는 방사성 물질들로서 전하를 띠기 때문에 생성 즉시 수증기, 먼지, 연기 등에 달라붙어 폐에 흡착한 후 평균 수십 분 정도 방사선을 방출하기 때문이다.

2. 해외의 주태라돈 건강위해성 연구

주태라돈의 폐암 유발 증거는 충분하다. 특히 Krewski et al.(2006)은 미국, Darby et al.(2006)은 EU, 그리고 Lubin et al.(2004)은 중국을 대상으로 통합연구(pooling study)를 수행했는데, WHO(2009)는 이 중요한 연구들이 모두 주태라돈과 폐암의 인과관계를 충분히 입증하고 있다고 결론짓는다. 유럽환경청(EEA, 2022)도 유럽에서 주태라돈의 건강위해성을 명확히 입증한 연구들을 많이 소개하고 있다. 특히 IARC(2001)는 주태라돈의 유일하고도 명백한 건강위해성으로 폐암을 들고 있다. 왜냐하면 주태라돈이 여성과 아동의 백혈병이나 폐 등의 장기가 굳는 섬유증(fibrosis) 등의 질병을 야기할 수 있다는 연구도 존재하지만 학계의 찬반이 엇갈리고 있기 때문이다(NAS, 1999; ACS, 2022).

주태라돈 폐암 위험의 심각성을 알리는 연구도 많다. USEPA(2022)는 인체가 받는 자연방사능의 50%는 주태라돈 때문이라고 본다. WHO(2022b)는 국가별로 주태라돈이 폐암 발병 원인의 3~14%를 차지하며 2019년에는 평균 4,000명 이상의 사망자를 유발한 것으로 추정한다. Darby et al.(2005)의 EU 13개국 연구는 주태라돈 폐암 사망자 수를 모든 암 사망자 수의 2%로 추정하였다. USEPA(2003)도 미국의 주태라돈이 연간 약 21,000명의 폐암 사망자를 발생시키는 것으로 보고하는데, 이는 미국에서 흡연 다음으로 많은 폐암 사망자 수이며, 음주운전, 식사, 주택화재 등에 의한 사망자 수를 넘어선다.

흡연자의 주태라돈 폐암 위험을 경고하는 연구도 많다. USEPA(2016)는 미국의 실내 라돈 평균 농도 수준(48 Bq/m^3)에서 폐암사망 위험은 평생 비흡연자가 0.2%, 흡연자는 그 10배 수준으로 추정하였고, 실내 환경 권고기준(148 Bq/m^3)에서의 폐암사망 위험도

4) ^{222}Rn 자핵종은 ^{222}Rn 의 방사성 붕괴 과정 중에 연쇄적으로 발생하는 폴로늄(Po), 비스무트(Bi) 등의 방사성 물질이다.

비흡연자가 0.7%, 흡연자는 그 9배 수준으로 추정하였다.⁵⁾ 더구나 Darby et al.(2005)의 EU 연구는 흡연자의 폐암 발병 위험을 평생 비흡연자의 25배까지 추정하였다.

3. 우리나라의 주택라돈 건강위해성 연구

우리나라는 1980년대 이후 주택라돈 농도의 측정에 관한 연구가 주를 이루었다(Yoon et al., 2016). 주택라돈의 건강위해성 연구는 폐암 발병에 초점을 맞춰 2010년경부터 본격적으로 축적되기 시작하였다.⁶⁾

Yoon et al.(2016)은 주택라돈이 폐암과 상관관계가 전혀 없었으며, 국내의 지역별, 연도별 주택라돈 농도의 차이도 지나치게 크다고 주장한다. Park et al.(2020)은 고농도 라돈 주택 거주자의 경우에 흡연자의 폐암 위험이 비흡연자보다 높은 것으로 추정하였다.⁷⁾ 이는 해외 연구 결과와 맥을 같이하는 결과이다. Park et al.(2020)은 2010년 국내 실내 라돈 폐암 사망자 수를 1,946~3,863명으로 추정하였는데, 신용승 외(2014)의 연구 결과를 준용하면, 이 중 99.1%가 주택라돈 사망자일 것으로 해석할 수 있다.

Kim et al.(2018)은 2010년의 폐암사망자 중 주택라돈에 의한 폐암사망자의 비율, 즉 폐암사망의 인구집단기여분율(population attributable fraction, PAF)을 12.5~24.7%로 추정하였다. 이에 따른 조기사망자 수는 1,953~3,859명이다. 그리고 Kim and Ha(2018)는 2011~2014년의 주택라돈 평균농도(69.4Bq/m^3)에 대응하는 남성과 여성의 PAF가 각각 6.7%와 4.7%이며, 2013년의 경우 총 1,039명의 주택라돈 조기사망자를 배출한 것으로 추정하였다. 주택유형별 라돈농도는 단독주택(116Bq/m^3), 다세대주택(74Bq/m^3), 아파트(56Bq/m^3) 순으로 추정하였다. 이 두 연구의 PAF 추정치는 세계의 남녀 평균 PAF추정치인 3.5%와 3.3%보다 높는데, 그 이유는 우리나라의 주택라돈 농도가 세계 평균보다 높기 때문일 것이다(Jin and Seo, 2018).

5) Bq(becquerel, 베크렐)은 1초에 1개의 원자핵이 붕괴할 때 발생하는 방사능을 나타내는 단위이다. 라돈농도 단위인 1Bq/m^3 는 1m^3 의 공기에 있는 원자핵이 1초간 붕괴할 때 발생하는 방사능에 해당한다. 미국이 사용하는 방사능 단위는 pCi(picocuri, 피코큐리)이며, 1pCi/L 는 37Bq/m^3 에 해당한다. 따라서 미국의 실내 평균 라돈농도와 라돈 권고기준인 1.3pCi/L 및 4pCi/L 는 각각 48Bq/m^3 및 148Bq/m^3 에 해당한다.

6) Lee et al.(2015)처럼 주택과 비주택을 포괄하는 실내의 라돈에 관한 연구도 축적되고 있지만, 본 논문의 조사 대상은 아니다.

7) 즉, 고농도 주택 흡연자의 폐암 위험이 고농도 주택 비흡연자의 폐암 위험과 저농도 주택 흡연자의 폐암 위험의 합보다 큰 것으로 나타났는데, 이는 라돈농도와 흡연이 폐암 발병에 상승작용을 보이는 증거로 해석할 수 있다는 것이다.

신용승 외(2014)는 주요 해외연구 모형을 활용한 우리나라 연구 중 신뢰성이 높은 연구인 것으로 보인다. 이 연구는 2010년의 주택라돈 폐암 사망자를 폐암 사망자 전체의 12.5%인 1,950명으로 추정하였다.⁸⁾ 그중 단독주택 사망자 비중(85.2%)이 절대적으로 높았으며, 다음으로 아파트(8.5%)와 연립다세대(6.3%) 순이었다. 라돈 가스가 공기보다 훨씬 무거워 가라앉는 성질이 있는데도 고층 아파트의 라돈 사망자 비중이 8.5%나 나온 것은 라돈 정책에 있어서 아파트의 영향도 무시할 수 없음을 시사한다.

지금까지 발표된 우리나라의 주택라돈 및 폐암 관계 연구 중에 해외처럼 대규모 표본과 엄격한 모형을 적용하여 주택라돈과 폐암의 인과관계를 도출한 연구는 찾기 어렵다. 따라서 본 논문은 차선택으로서 신용승 외(2014)의 연구결과를 인용하여 주택라돈 저감의 화폐적 편익을 추정할 것이다. 본 논문이 해외의 주요 연구들 대신 우리나라 연구인 신용승 외(2014)를 인용하는 이유는 국가별로 라돈농도 분포, 생물학적 특성 등이 달라서 폐암 발생 건수 추정에 큰 편차가 있을 것이기 때문이다.

4. 국내외의 주택라돈 저감 가치 평가 사례

위에서 살펴본 주택라돈의 폐암 효과는 주택라돈 저감의 화폐적(monetary) 가치와 비화폐적(non-monetary) 가치를 평가하는 데 활용될 수 있다. 이 중 주택라돈 저감의 비화폐적(non-monetary value) 가치를 평가한 사례는 많으나 화폐적 가치를 평가한 사례는 별로 없다.

주택라돈 저감의 비화폐적 가치 평가 사례부터 살펴보면, WHO(2009)는 주택라돈 저감 효과로 건강한 삶의 햇수를 나타내는 질보정수명(quality-adjusted life-year, QALY)을 추정한 연구들과 폐암생활 및 사망으로 손실된 수명을 합한 장애보정생존년수(disability-adjusted life year, DALY)를 추정한 연구들을 풍부히 소개하고 있다. Gaskin et al.(2019)은, 2012년 캐나다 경우, 주택라돈 농도를 낮춰 폐암사망자 수를 줄이는 시나리오는 실질적 효과가 있었으며, 가장 비용효과적인 시나리오는 신축주택의 라돈축적 예방 장치와 기존 주택의 라돈농도 저감 장치를 병행하는 시나리오라고 결론지었다.

우리나라의 경우, Kim et al.(2018)은 2010년의 주택라돈 폐암 사망에 의한 손실수명

8) 실내 라돈 폐암사망자 중 주택라돈 폐암사망자를 제외한 다중이용시설 등의 비주택 사망자는 실내 사망자의 0.9%인 18명에 불과하여 주택라돈 사망자가 실내 라돈 사망자의 절대 다수를 차지하는 것으로 나타났다.

연수(year of life lost, YLL)를 43,140~101,855년으로 추정하였다. 그리고 Kim and Ha(2018)은 2013년에 주택라돈 폐암 발생으로 남성과 여성 각각 12,750년 및 4,022년의 DALY가 손실되었을 것으로 추정하였다. 역으로, 2013년의 주택라돈 폐암을 예방하면 동일한 연수의 DALY가 저감되는 가치를 지니는 것으로 해석할 수 있다.

주택라돈 저감의 화폐적 가치 평가 사례는 흔하지 않다. 신용승 외(2014)는 주택라돈 저감의 화폐적 편익을 추정하기 위해 신영철·조승헌(2003)이 추정한 대기오염 사망자의 VSL인 2010년 가격 6억 1,400만 원을 편익이전(benefit transfer)한 값을 이용하였다. 그러나 이는 주택라돈 저감에 따른 VSL이 아니다. 그리고 주택라돈 저감의 화폐적 비용을 추정하지 않아 비용편익분석을 실시하지 않은 한계가 있다.

주택라돈 저감의 편익과 비용을 모두 화폐가치로 추정하고 비용편익분석을 실시한 예는 Kim(2004)이다. 진술선호법(stated preference method, SPM)의 일종인 CVM과 선택실험법(choice experiment, CE)을 이용하여 1999년 영국의 남서부 지방의 가구를 표본으로 주택라돈 저감의 경제적 편익을 다양한 가정하에 추정하였다. 즉, 주택라돈 농도의 저감 범위, 라돈 저감장치를 설치한 가구의 비중, 방법론과 모형의 선택 등에 대한 가정들을 도입하여 다양한 추정 결과를 도출하였다. 가장 현실적인 시나리오로서 주택라돈 농도를 영국 평균(20Bq/m^3)에서 평균 이하 가구의 평균(10Bq/m^3)으로 저감할 경우의 편익 추정치로서 CE 혼합로지트모형(mixed-logit model)은 £ 157백만~£ 497백만, CVM 로짓모형은 £ 504백만~£ 709백만을 도출하였다. 또한 이 편익들을 라돈 저감 장치 설치 비용과 대비시킨 후 비용편익비율(cost-benefit ratio)이 1보다 큼을 보여주면서 주택라돈 저감 사업이 경제성이 높은 공공사업이라고 결론지었다.

III. 모형 추정

1. 계량 모형

본 논문은 주택라돈 저감 편익을 추정하기 위해 단일양분선택형⁹⁾ CVM 설문조사용

9) 이 질문방식은 제시된 주택라돈 사망위험 저감 비용을 수용할 것인지 한 번 묻고 끝나는 방식이다. 이 방식은 지불의사 질문을 두 번하는 이중양분선택형 질문방식보다 추정의 비효율성이 높은 단점이 있지만(Hanemann, Loomis and Kanninen, 1991), 후자는 출발점 편익(Herriges and Shogren, 1996)로 인해 추정의 신뢰성이 저하

답자료를 이용하여 로짓모형을 추정한다. 계량모형 설정을 위해 우선 주어진 소득수준 y 가 변하지 않는 가운데, 자신의 주택 내 라돈에 대한 노출로 자신이 폐암에 걸려 조기에 사망할 위험을 현재의 q_0 수준보다 낮은 q_1 수준으로 감소시키기 위해 특정한 비용 C 를 지불할 것인지를 결정해야 하는 개인 i 를 생각해 보자. 확률모형극대화 모형(Hanemann, 1984)을 적용하면, i 는 폐암사망 위험을 낮추기 위해 C 를 지불할 경우의 효용이 동 위험을 낮추지도 않고 C 를 지불하지도 않는 경우의 효용보다 작지 않을 경우에만 C 를 지불할 의사가 있을 것이다.

$$v(q_1, y - C) \geq v(q_0, y) \quad (1)$$

이 경우 i 의 C 에 대한 최대 지불의사액 WTP_{\max} 은 다음 식에 의해 결정된다.

$$v(q_1, y - WTP_{\max}) = v(q_0, y) \quad (2)$$

그런데, 연구자 입장에서는 i 의 간접효용함수 v 를 모르기 때문에 WTP_{\max} 를 추정할 수 없다. 그러므로 v 를 측정이 가능한 효용 부분 w 과 측정이 불가능한 확률적 효용 부분 ϵ 으로 나누어 위 식을 아래의 확률효용함수 관계식들로 나타낼 수 있다.

$$w(q_1, y - WTP_{\max}) + \epsilon_1 = w(q_0, y) + \epsilon_0 \quad (3)$$

WTP_{\max} 를 계산하기 위해서 v 의 구체적인 함수 형태를 아래의 Box-Cox 간접효용함수(Hanemann and Kanninen, 1999)로 상정한다. 단, $q = 0, 1$.

$$v = \alpha_q + \beta_q \left[\frac{y^\lambda - 1}{\lambda} \right] + \epsilon_q \quad (4)$$

본 논문은 이 함수에서 $\lambda = 1$ 이라고 가정한다. 이 경우 위 식은 CVM 연구에서 보편적으로 사용되는 선형의 v 가 된다.

될 수 있는 단점이 있다. 주택라돈 사망위험 저감에 대한 지불의사를 추정하는 본 논문의 경우, 전자의 단점보다 후자의 단점이 더 크다고 판단하여 전자를 이용하였다.

$$v = \alpha_q + \beta_q y + \epsilon_q \quad (5)$$

이제 표준로짓모형(Hanemann, 1984)을 추정하고자 하는 본 논문의 경우, 식 (3)과 식 (5)를 이용하여 아래 식을 도출할 수 있다.

$$\alpha_1 + \beta_1(y - WTP_{\max}) + \epsilon_1 = \alpha_0 + \beta_0 y + \epsilon_0 \quad (6)$$

β_1 과 β_0 이 동일한 가치를 지니는 화폐의 한계효용이라고 보면, 다음 식이 도출된다.

$$\eta = -\alpha + \beta WTP_{\max} \quad (\text{단, } \eta \equiv \epsilon_1 - \epsilon_0, \alpha \equiv \alpha_1 - \alpha_0) \quad (7)$$

이 식에서 CVM 설문조사 결과를 활용하면 WTP_{\max} 가 도출 가능하다. 그렇지만 연구자는 v 의 모습을 정확히 알지 못하므로 WTP_{\max} 는 확률변수이다. CVM 조사시 조사자가 제시하는 주택라돈 노출에 의한 사망위험을 낮추는 비용 C 가 응답자 자신이 생각하는 WTP_{\max} 보다 크지 않다면 C 를 지불하려고 할 것이다. 다음은 C 를 지불한다고 응답할(yes) 확률이다.

$$\text{Prob}(yes) = \text{Prob}(WTP_{\max} \geq C) = \text{Prob}(\eta \geq -\alpha + \beta C) \quad (8)$$

단, g_η 는 η 의 밀도함수, G_η 는 누적밀도함수이다.

$$\text{Prob}(yes) = 1 - G_\eta(-\alpha + \beta C) \quad (9)$$

여기서, η 이 표준적 로지스틱 분포를 따르는 것으로 가정하면 아래 식이 도출된다.

$$\text{Prob}(yes) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(\alpha - \beta C)} = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta C)} \quad (10)$$

여기서 로그우도함수를 활용해 α 및 β 를 추정하면 WTP_{\max} 의 추정도 가능하다. 본 논문은 양분선택형 CVM 질문을 통해 주택라돈 사망위험을 낮추기 위한 C 의 수용 의사를 물었기 때문에 다음의 우도함수를 이용해 α 와 β 를 추정할 수 있다. $y = 0$ 은 C 거부 응답, $y = 1$ 은 C 수용 응답이다.

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta C)} \right]^{y_i} \times \left[\frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta C)} \right]^{(1 - y_i)} \quad (11)$$

결국 α 와 β 를 추정하기 위해 극대화하려는 로그우도함수는 아래와 같다.

$$\ln L(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \left[y_i \ln \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta C)} + (1 - y_i) \ln \frac{1}{1 + \exp(-\alpha + \beta C)} \right] \quad (12)$$

2. 분석 자료

이상의 α 와 β 추정을 위한 CVM 분석 자료를 확보하기 위해 2022년 4월 중에 설문조사 전문기관을 통해 연령별 및 성별 전국 인구비례할당 인터넷조사를 하였다.

응답자에게 라돈은 회피할 수 없는 방사성 기체임을 강조하고, 라돈 사망위험이 높은 곳은 주택이며 흡연자의 사망위험이 특히 높음을 주지시켰다. 라돈은 인지하기 어렵지만, 정확한 측정이 가능하고 주택라돈 저감장치를 시중에서 살 수도 있다고 알렸다. 주택라돈에 관한 위험인식 질문도 추가하였다. 주택라돈 사망위험 인지도, 생명에 대한 라돈의 치명도, 라돈사망의 두려움, 라돈위험 저감 가능성, 사망의 지연 정도, 위험의 불공평성 등에 관해 물었다. 이 질문들은 제시금액 수용 여부를 판단할 때 도움을 주고 라돈 위험에 친숙해지도록 하는 예열(warm-up) 목적도 있었다.

WTP 관련 질문으로는, 응답자 주택의 주택라돈 농도를 측정하거나 저감할 수 있는 제품이나 서비스가 있으며, 이를 구매하면 사망위험을 줄일 수 있지만 비용을 추가로 지출해야 한다고 알림으로써 사망위험과 비용지출 간의 역관계(trade-off)를 주지시켰다. 그 후 응답자의 1년간 주택라돈 폐암사망 확률이 7만분의 2가 감소할 경우에 주어진 WTP 제시액을 1년간 지불할 의사가 있는지 물었으며, 이 선택이 5년간 해마다 계속된다고 하였다. 확률 모수를 7만으로 정한 것은 최대 7만 명을 수용할 수 있는 서울올림픽 주경기장 사진을 <그림 1>과 같이 시각자료로 제시하고 그중 2명이 사망할 미세한 확률을 좀 더 정확히 인지할 수 있도록 하려는 것이었다.

이 폐암사망 확률을 줄이기 위해 각 응답자에게 1만 원, 3만 원, 8만 원, 12만 원, 18만 원 중 1개를 제시한 후 수용 의사를 물었으며, 제시액이 성별, 연령별로 골고루 배분되도록 하였다.¹⁰⁾

〈그림 1〉 서울올림픽 주경기장 사진



3. 모형 추정

1) 유효표본

본 논문의 최종 분석 대상이 된 유효표본을 선별하기 위해 총 645개의 응답들 중 저항 응답을 선별하였다. 저항응답은 주택라돈 사망위험을 줄이기 위한 제시금액을 전혀 수용할 의사가 없다고 밝힌 응답들 중 그 이유가 경제학적으로 볼 때 비합리적인 응답이다.

<표 1>은 전체 표본 중 유효표본과 저항응답을 보여준다. 특히 WTP가 전혀 없는 이유가 경제적인 여유가 없거나 자신의 사망위험을 낮출 필요성을 느끼지 못하는 경우에는 유효표본으로 간주하고, 주택라돈 사망위험 저감 책임을 정부, 주택건설업체, 주택구매자, 세금, 설문조사 탓으로 돌리든지 라돈 위험을 모르거나 통제할 수 없다는 등으로 응답한 것은 저항응답으로 간주하였다. 저항응답률은 17.1%, 유효표본은 535개로 나타났다.

10) 본 논문은 합리적인 제시액 선정을 위해 국내 연구를 대표하는 안소은 외(2018)와 주요 해외 연구인 Lindhjem et al.(2010)를 참조하였다. 전자의 연구는 기존 연구들의 VSL 추정치들을 메타회귀분석하여 14~15억 원의 평균 VSL 추정치를 구했다. 후자의 연구는 기존 진술선호법(SPM) 연구들의 VSL 추정치들을 메타분석하여 약 350만 달러의 평균 VSL를 구했다. 본 논문은 이 두 VSL 추정치들을 단순평균하여 약 31억 원(2022년 가격)의 VSL를 구했다. 따라서 주택라돈 폐암사망 확률 7만분의 2 감소에 상응하는 WTP는 31억 원을 7만분의 2로 나눈 88,145원 정도가 된다. 본 논문은 이 수치의 약 2배인 18만 원을 제시금액 상한으로 하고 출발선은 1만 원으로 정했다.

〈표 1〉 유효표본과 저항응답

응답 유형	N
전체	645
유효표본	535
WTP가 있는 응답	444
경제학적 합리성에 근거하여 WTP가 없는 응답	91
경제적인 여유가 없다	41
주택라돈 사망위험을 낮추는 데 관심이 없다	48
기타	2
저항응답 (저항응답률)	110 (17.1%)
주택라돈 사망위험을 낮추는 일은 정부의 책임이다	57
세금을 사용해 사망위험을 낮춰야 한다	28
설문조사 자체를 신뢰하기 어렵다	10
설문조사 내용을 이해할 수 없다	10
기타	5

<표 2>는 유효표본의 특성을 나타낸다. 약 51%는 여성, 평균 연령 46세, 월소득 357만원, 교육 수준은 대학 4학년 수준이다. 최초 제시액 수용률은 46%였다.

〈표 2〉 유효표본의 특성

연령	여성응답률	월소득	교육 수준	최초 제시액 (선택확률)
45.7세	50.8%	357만 원	대학 4학년	83,588원 (46.2%)

2) 모형 추정

응답 자료를 이용하여 주택라돈 사망위험 저감을 위한 WTP를 도출하기 위해 통계패키지 LIMDEP을 사용하여 로짓모형을 추정하였다.

<표 3>은 전체(full) 로짓모형 추정 결과를 나타낸다. 지불의사 제시액과 상수항은 1% 유의수준에서 유의하였다. 이는 식 (12)의 α 와 β 를 유의성 있게 추정해야 하는 본 논문에 있어서 중요한 의미를 지닌다. 다만, 소득은 10% 수준에서 유의하였는데, 이는 사망위험 저감의 경제적 가치를 추정하는 본 논문에 있어서 불만족스러운 결과이다.

위험인식 변수인 ‘친숙성’은 5% 수준에서 유의하였고 이론적 예측에 부합하는 결과

이다. 이는 주택라돈 사망위험에 대해 친숙할수록(familiar) 사망위험을 줄이기 위해 지불할 의사가 낮음을 의미한다. Covello and Sandman(2001)에 따르면 일반 대중은 친숙하지 않은 위험일수록 위험을 과대평가하는 경향이 있다. 여타 위험인식 변수들은 유의도가 매우 낮고 일부의 부호는 경제적 예측에도 위배되는 것으로 나타났다. 특히 주목해야 할 변수는 응답자들에게 흡연자의 주택라돈 사망위험이 비흡연자의 10배에 달한다는 정보를 제공했음에도 불구하고 추정계수가 유의하지 않았고 그 부호는 오히려 선행적 예측과 반대로 나타났다. 즉, 흡연자일수록 주택라돈 사망위험 저감을 위한 지불의사가 낮은 것으로 추정된 것이다. 그리고 McFadden Pseudo R² 값도 0.593 정도로서 높지 않다. 따라서 본 논문은 전체 로짓모형 추정 결과를 이용하여 주택라돈 사망위험 저감을 위한 WTP를 추정하지는 않는다. 비록 α 와 β 의 추정 결과가 유의하지만, 소득 변수가 5% 수준에서 유의하지 않고 상수항 외에는 α 에 포함시킬 수 있는 다른 유의한 변수들이 거의 없기 때문이다.

〈표 3〉 전체 로짓모형 추정 결과

분류	변수	추정계수	표준오차	P-값
사회경제적 변수	상수항	3.883099	0.927000	0.0000***
	제시액	-0.005136	0.001482	0.0005***
	성별	-0.003641	0.207795	0.9860
	연령	-0.012923	0.007308	0.0768*
	교육 수준	-0.236483	0.161406	0.1429
	흡연자	-0.083437	0.129312	0.5188
	소득	0.000089	0.000051	0.0791*
위험인식 변수	친숙성	-0.312929	0.140081	0.0255**
	치명성	-0.046195	0.181137	0.7987
	두려움	-0.164789	0.168346	0.3276
	재앙성	-0.186677	0.176577	0.2904
	통제성	-0.138922	0.133413	0.2977
	지연성	-0.022323	0.091694	0.8077
	공평성	-0.050523	0.141872	0.7128

주: 1) N=535. 모형유의확률 0.00000 (McFadden Pseudo R²: 0.5928)

2) 유의수준 *10% **5% ***1%.

3) 제시액을 1,000원 단위로 변경하여 추정한 결과임.

본 논문은 β 와 상수항만 포함하는 α 로 구성된 기본모형을 추정하여 WTP를 추정하는 CVM 연구 관행에 따른다. <표 4>는 기본 로짓모형을 추정한 결과이다. 제시액과 상수항은 모두 1% 수준에서 유의하였으며 제시액의 부호도 화폐의 한계효용이 양(+)임을 의미하므로 경제학의 이론적 예측에 부합한다. 모형의 유의확률도 높았다.

<표 4> 기본 로짓모형 추정 결과

변수	추정계수	표준오차	P-값
상수항	0.380199	0.147170	0.0098***
제시액	-0.006479	0.001454	0.0000***

주: 1) 모형유의확률 0.00000 (McFadden Pseudo R²: 0.0279). 유의수준 ***1%.
 2) 제시액을 1,000원 단위로 변경하여 추정한 결과임.

IV. 사회적 비용과 편익 추정

1. 통계적 생명가치 추정

이제 로짓 기본모형의 추정으로 도출된 α 값과 β 값을 이용하여 WTP의 확률분포를 구한다. 본 논문은 η 가 표준 로지스틱분포를 따른다고 가정하므로 η 의 평균은 $E(\eta) = 0$ 이 된다. 식 (7)로부터 로짓모형의 WTP_{max} 계산식을 구하면 다음과 같다.

$$WTP_{max} = \frac{\alpha}{\beta} \tag{13}$$

이 계산식이 비선형제약을 지니므로 왈드검증(Wald test)을 이용하여 WTP함수를 추정한 결과, <표 5>와 같이 WTP 추정계수와 모형이 모두 유의한 것으로 나타났다. 주택 라돈 사망위험 저감에 대한 평균 WTP는 58,678원인 것으로 나타났다. 신뢰구간은 30,407원~86,949원이다.

<표 5> 주택라돈 사망위험 저감의 WTP 추정 결과

추정계수	표준오차	신뢰구간	t-값	P-값	왈드 통계량
58,678	14,424	30,407 ~ 86,949	4.068	0.0000	16.55

주: N=535. 모형유의확률 0.00005.

이 WTP 추정치는 CVM조사 응답자들이 주택라돈 사망위험을 7만분의 2 줄이는 데 대응한 값이다. 사망위험을 100% 줄이는 WTP_{max} 는 다음 식으로 계산할 수 있으며, 그 값은 VSL을 나타낸다. 단, $\Delta p = p_1 - p_0$ 이다. p_1 은 사망위험 저감 후의 사망위험 수준, p_0 은 사망위험 저감 전의 사망위험 수준을 나타낸다.

$$VSL = \frac{WTP_{max}}{\Delta p} \quad (14)$$

이 식에 사망위험을 2/70,000(Δp) 줄이기 위한 WTP 58,678원을 대입하면, <표 6>과 같이 주택라돈 사망자의 통계적 생명가치는 평균 20억 5,373만 원으로 추정된다. 신뢰 구간 하한값은 10억 6,425만 원, 상한값은 30억 4,322만 원이다.

<표 6> 주택라돈 사망에 따른 통계적 생명가치

평균 VSL	하한값	상한값
20억 5,373만 원	10억 6,425만 원	30억 4,322만 원

2. 주택라돈에 의한 폐암사망의 사회적 비용 추정

평균 VSL 추정치를 주택라돈으로 인한 폐암사망자 수에 곱하면, 사망자 수에 기초한, 주택라돈 노출의 사회적 비용이 추정되며, 또 주택라돈 저감으로 인해 감소한 폐암사망자 수에 곱하면 주택라돈 저감의 사회적 편익이 추정된다. 본 논문은 우리나라 주택라돈의 폐암사망 관련 연구를 수행한 신용승 외(2014)의 연구결과를 인용하여 이 사회적 비용과 편익을 화폐단위로 추정할 것이다.¹¹⁾

먼저 주택라돈 노출의 사회적 비용을 추정한 결과는 <표 7>과 같다. 신용승 외(2014, p.45)에 의하면, 우리나라의 주택라돈 발생으로 인한 폐암 발생 위험도는 2010년의 경우 총 폐암사망자 수의 12.48%이다. 따라서 2010년의 총 폐암사망자 수는 15,625명이므로 동년에 주택라돈으로 인한 폐암사망자 수는 1,950명으로 추정된다. 따라서 본 논문의 VSL 추정치에 1,950명을 곱하면 2010년 주택라돈 폐암사망자의 통계적 생명가치는

11) 앞서 언급한 바가 있듯이, 신뢰성 있는 해외 연구들이 존재하지만, 주택라돈과 그 건강위해성 평가는 국가별 환경에 크게 좌우될 수 있기 때문이다.

2022년 현재 가격으로 약 4조 48억 원이 될 것으로 추정한다. 신용승 외(2014)의 모든 가정들이 2020년 현재에도 그대로 작동한다고 가정하면, 2020년의 사회적 비용은 4조 7,860억 원으로서 2010년 대비 19.5%(7,812억 원) 증가한다.

〈표 7〉 주택라돈 폐암사망의 사회적 비용

평균 생명가치	2010	2020
총 폐암사망자 수(명)	15,625	18,673
주택라돈 폐암사망자 수(명)	1,950	2,330
평균 VSL 추정치(백만 원)	2,053.73	2,053.73
주택라돈 폐암사망의 사회적 비용(억 원)	40,048	47,860

3. 주택라돈 저감의 사회적 편익 추정

현재 우리나라의 실내공기질 관리기준을 요약한 <표 8>에 따르면, 라돈은 「실내공기질 관리법 시행규칙」상 유지기준이 아니라 권고기준 항목이다.¹²⁾ 라돈의 권고기준은 148Bq/m³ 이하인데, 모든 다중이용시설과 신축 공동주택의 경우에만 적용된다. 주택에 국한하면, 기존 공동주택과 모든 단독주택은 권고기준 적용 대상에서 제외된다.

〈표 8〉 우리나라의 실내공기질 관리기준

구분	다중이용시설 ¹⁾		주택	
			단독주택	공동주택 ²⁾
	유지기준	권고기준	유지기준	권고기준
기존	-	148Bq/m ³ 이하	-	-
신축	-	148Bq/m ³ 이하	-	148Bq/m ³ 이하

주: 1) 지하역사, 실내주차장, 어린이집, 업무시설 등 비주택건물.

2) 아파트, 연립주택, 다세대주택.

본 논문은 신용승 외(2014)의 연구가 추정한 사회적 편익과 비교하기 위해 3개 주택라돈 관리기준 시나리오에 대한 사회적 편익을 추정한다. 시나리오 1은 모든 유형의 주택에 대해 규제기준(compulsory standard) 148Bq/m³를 적용하는 경우이다. 규제기준은

12) 유지기준은 기준 위반 시 과태료 등의 법적 제재를 받으나 권고기준은 위반하더라도 법적 제재를 받지 않는다.

주택라돈 저감에 대해 강제력을 지니는 기준으로서 자발성에 의존하는 권고기준 (voluntary standard)보다 강한 관리기준이다. 시나리오 2는 모든 주택에 대해 규제기준 200Bq/m³를 도입하는 경우이다. 시나리오 3은 모든 주택에 대해 규제기준 400Bq/m³를 도입하는 경우이다. <표 9>에서 보듯이 모든 주택에 대해 규제기준 400Bq/m³, 200Bq/m³ 및 148Bq/m³를 도입하면 주택라돈 사망자가 각각 129명, 691명 및 1,016명 감소하여 각각 연간 2,649억 원, 1조 4,191억 원 및 2조 866억 원의 사회적 편익이 발생한다. 규제기준이 강화될수록 사회적 편익이 급격히 증가함을 알 수 있다. 신용승 외(2014)의 2010년 기준 사회적 편익 추정치를 2022년 11월 말 현재가치로 평가하여 비교하면, 모든 시나리오에서 본 논문의 사회적 편익이 약 2.6배의 높은 결과가 도출되었다. 이는 신용승 외(2014)가 편익이전한 신영철·조승현(2003)의 대기오염 사망자 VSL 추정치가 본 논문의 추정치보다 약 2.6배 낮기 때문이다.

<표 9> 주택라돈 저감 시나리오별 사회적 편익

시나리오	관리기준 (Bq/m ³)	사망자 감소수 (명)	평균 VSL (백만 원)	사회적 편익 (억 원)	신용승 외(2014)의 사회적 편익(억 원)
1	148	1,016	2,053.73	20,866	7,880
2	200	691	2,053.73	14,191	5,359
3	400	129	2,053.73	2,649	1,000

주: 사회적 편익은 모두 2022년 11월 말 현재 가격으로 평가하였음.

본 논문은 시나리오 2의 사회적 편익 추정치 1조 4,191억 원을 가장 현실적인 추정치로 보아 대표적인 추정치로 선택한다. 왜냐하면 현재 가장 강한 관리기준은 신축 공공주택에 유일하게 적용되는 148Bq/m³인데, 이도 강제성이 없는 권고규정에 불과하기 때문이다. 더구나 148Bq/m³을 강제력이 있는 규제기준으로 모든 유형의 주택에 적용하는 것은 무리한 면이 있다. 반대로 400Bq/m³의 규제기준을 모든 유형의 주택에 적용하는 것도 너무 느슨한 정책으로 생각된다.

V. 결론

본 논문은 주택라돈 저감으로 인한 폐암사망 예방 시 발생하는 VSL을 20조 5,373억 원으로 추정하였다. 그리고 신용승 외(2014)의 가정에 입각하여, 2010년에 주택라돈 노출로 인해 1,950명이 폐암으로 사망함으로써 총 4조 48억 원의 사회적 비용이 발생하였음을 도출하였다. 2020년에는 사망자 수가 2,330명으로 늘어서 사회적 비용도 7,812억 원이 증가한 4조 7,860억 원인 것으로 추정하였다.

본 논문은 3개의 시나리오에 기초하여 사회적 편익을 추정하였다. 본 논문을 대표하는 가장 현실적인 시나리오는 모든 유형의 주택에 200Bq/m³의 규제기준을 도입하는 것이다. 이 경우 연간 691명의 주택라돈 사망자가 감소하여 1조 4,191억 원의 사회적 편익이 발생하는 것으로 추정된다. 나머지 두 시나리오로서, 규제기준을 148Bq/m³로 더 강화하거나 400Bq/m³로 더 완화할 경우, 각각 1,016명과 129명의 주택라돈 사망자가 감소함으로써 사회적 편익이 각각 2조 866억 원과 2,649억 원으로 급격히 증감한다.

이같이 큰 사회적 편익 추정 결과는 국민이 주택라돈 저감을 통한 폐암사망 위험 감소에 부여하는 가치가 적지 않음을 나타낸다. 예컨대, 본 논문의 사회적 편익 추정치는 신용승 외(2014)보다 약 2.6배나 크다. 이는 본 연구가 CVM 응답자들에게 주택라돈 저감에 대한 WTP를 물어서 편익을 추정한 반면, 신용승 외(2014)는 신영철·조승현(2003)이 CVM 응답자들에게 대기오염 사망위험 저감에 대한 WTP를 물어서 추정한 값을 편익 이전하여 편익을 추정하였기 때문이다. 이 결과는 평균적인 국민들이 주택라돈 폐암사망 위험을 낮추는 가치를 적어도 대기오염 사망위험을 낮추는 가치보다는 2.6배 높게 평가한다는 것에 대한 방증이다.¹³⁾

그럼에도 불구하고 지금까지 우리나라에서 주택라돈 정책의 중요성은 과소평가되어 온 것으로 보인다. 예컨대, 라돈과 석면은 국제암연구소(IARC, 2001)가 지정한 1군 발암물질들이지만, 우리나라의 라돈예산은 늘 석면예산보다 월등히 적게 편성되어 왔다. 그러나 우리나라 석면 관련 사망자 수를 최초로 추정한 Kim et al.(2016)에 따르면, 2014

13) 물론 본 논문은 응답자에게 사망 시점을 특정하지 않고 언제든 사망할 확률을 제시하는 관행을 따른 반면, 신영철·조승현(2003)은 70세 이후 10년 동안 사망할 확률을 제시하였다는 점에서 후자의 편익 추정치가 과소평가되었을 가능성은 있다.

년 이후 22년간 발생할 석면 관련 사망자 수는 총 1,942명에 불과하다. 이는 본 논문에서 추정된 1년간의 주택라돈 사망자 2,330명에도 못 미치는 수준이다. 이 결과는 석면예산의 과대평가나 라돈예산의 과소평가 또는 양자의 동시 발생 중 하나에 원인이 있을 것이다. 따라서 예산의 효율적 관리나 정책의 효율성 측면에서 석면예산의 일부를 라돈예산으로 전환하거나 라돈예산 자체를 증액시킬 근거를 본 논문의 추정 결과가 제시하고 있다.

라돈 정책 담당자는 주택라돈 저감의 사회적 가치가 높다는 사실을 적극 활용하여 관련 예산을 획기적으로 늘릴 수 있도록 지속적으로 노력할 필요가 있다. 그렇지 않으면 관련 예산 책정액의 만성적인 부족은 면하기 어려울 것이다. 일례로, 한국환경공단과 한국원자력안전기술원 등이 지금까지 수만 가구에 대해 라돈 무료 측정 서비스를 제공해 왔지만 전국 가구수 대비 측정 비율은 주요국에 비해 크게 낮은 편이다. 또 한국환경공단(2022)이 2012년부터 라돈 무료 측정 및 저감컨설팅 서비스를 제공하고 있으나¹⁴⁾ 주택라돈의 저감에 큰 도움을 주는 수준은 아니다. 환경부는 2019년부터 라돈농도가 높은 지자체의 라돈 관리에 행정적, 기술적, 재정적으로 지원하고 있다. 하지만 이 같은 제도적인 보완만으로는 주택라돈 측정수의 획기적인 증가를 이끌어내기는 역부족일 것이다.

예산이 증액되면 당장 착수해야 할 중요한 일들이 많다. 예컨대, 주택라돈의 건강위해성에 대하여 보다 지속적이고도 강력하게 홍보를 강화할 수 있는 예산을 절대적으로 증액할 필요가 있다. 또한 우리나라 특유의 주택 구조와 특성, 라돈농도의 계절적 분포, 인체적 특성 등에 맞는 건강위해성 평가 연구를 위해 대규모 예산 증액이 필요할 것이다. 특히 일반 국민들이 주택라돈 농도 취약지역을 촘촘하게 열람할 수 있는 전국라돈지도 제작하고, 이를 위해 무료 측정 및 컨설팅 지원 예산을 획기적으로 증대시킬 수도 있다.

결론적으로, 본 논문 결과는 국민이 부여하는 주택라돈 저감의 사회적 가치가 높은 만큼 주택라돈 정책도 이에 걸맞은 역할과 예산 배분이 필요함을 시사한다. 그러나 현실은 주택라돈 정책의 중요성이 지나치게 과소평가되어 있으므로, 주택라돈 정책의 중요성을 널리 알려 예산 배분의 비효율성을 치유하고 사망자 수의 감소를 가져올 수 있도록 본 논문의 결과를 충분히 활용해야 할 것이다. 이는 정부예산 절감과 국민보건 증진에 기여함으로써 코로나19 팬데믹과 세계경제 위기로 대변되는 뉴노멀(New Normal) 시대에

14) 2021년까지 10년간 총 1만 가구 정도의 주택을 측정 및 컨설팅하였고 4천 가구 정도의 주택에 라돈 알람기를 제공하였으며 2백여 가구의 라돈 저감을 시공하였다.

정부지출의 효율성을 제고시켜 정부재정 건전성 악화 추세를 예방할 수 있다는 점에서도 의미가 있다.

사회적 편익의 추정에 있어서, 본 논문은 뚜렷한 한계도 지니고 있다. 즉, 사회적 비용과 편익의 추정에 필수적인 주택라돈 저감의 사망자수 감소 효과를 현재 기준으로 본 논문이 직접 추정하지 못하고 2010년 기준으로 추정한 신용승 외(2014)의 연구 결과에 의존했다는 점이다. 이에 따라 본 연구는 현재에 더욱 적합한 시나리오와 가정들을 분석하는데 한계가 있었다.

[References]

- 신영철·조승현, “미래의 사망가능성 감소에 대한 지불의사금액과 통계적 인간생명의 가치 측정: 환경적 피해와 환경정책의 평가를 위한 통계적 인간생명의 가치”, 「자원·환경경제연구」, 제12권 제1호, 2003, pp. 49~74.
- 신용승·김선덕·조성경·임종한, “라돈의 실내공기질 규제에 따른 위해저감 효과 및 건강편익 산정”, 정책보고서 2014-12, 한국환경정책·평가연구원, 2014.
- 안소은·김현노·김충기·서양원·정다운·전호철·이승준·김진옥·이홍림·홍현정·윤태경·박윤선·엄영숙·강완모·송용식·최새미·이창훈·문난경·한대호, “환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구: 부문별 영향평가 및 가치추정”, 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 제2권, KEI사업보고서 2018-06-02, 한국환경정책·평가연구원, 2018.
- 한국환경공단, 라돈 무료측정 및 저감컨설팅, 2022.11.4. 방문., <https://keco.or.kr/kr/business/research/contentsid/2902/index.do>
- American Cancer Society, “Radon and Cancer,” Accessed November 21, 2022., <https://www.cancer.org/healthy/cancer-causes/radiation-exposure/radon.html>
- Covello, V., P. M. Sandman, “Risk communication: Evolution and Revolution,” in A. Wolbarst(ed.), *Solutions to an Environment in Peril*, Baltimore: John Hopkins University Press, 2001, pp. 164~178.
- Darby, S., D. Hill, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, H. Deo, R. Falk, F. Forastiere, M. Hakama, I. Heid, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I.

- Mäkeläinen, C. Muirhead, W. Oberaigner, G. Pershagen, A. Ruano-Ravina, E. Ruosteenoja, A. Schaffrath Rosario, M. Tirmarche, L. Tomásek, E. Whitley, H-E. Wichmann, R. Doll, "Radon in Homes and Risk of Lung Cancer: Collaborative Analysis of Individual Data from 13 European Case-control Studies," *British Medical Journal*, Vol. 330, No. 7485, 2005, pp. 223~227.
- Darby, S., D. Hill, H. Deo, A. Auvinen, J. M. Barros-Dios, H. Baysson, F. Bochicchio, R. Falk, S. Farchi, A. Figueiras, M. Hakama, I. Heid, N. Hunter, L. Kreienbrock, M. Kreuzer, F. Lagarde, I. Mäkeläinen, C. Muirhead, W. Oberaigner, G. Pershagen, E. Ruosteenoja, A. Schaffrath Rosario, M. Tirmarche, L. Tomásek, E. Whitley, H-E. Wichmann, R. Doll, "Residential Radon and Lung Cancer: Detailed Results of a Collaborative Analysis of Individual Data on 7148 Subjects with Lung Cancer and 14208 Subjects without Lung Cancer from 13 Epidemiologic Studies in Europe," *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, Vol. 32, No. 1, Supplement 1, 2006, pp. 1~83.
- European Environment Agency, "Radon," Accessed 14 November, 2002., <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-burden-of-cancer/radon>
- Gaskin, J., D. Coyle, J. Whyte, N. Birkett, D. Krewski, "A Cost Effectiveness Analysis of Interventions to Reduce Residential Radon Exposure in Canada," *Journal of Environmental Management*, Vol. 247, 2019, pp. 447~461.
- Hanemann, W. M., B. Kanninen, "The Statistical Analysis of Discrete-Response CV Data," in I. J. Bateman and K. G. Willis(eds.), *Valuing Environmental Preferences: Theory and Practice of the Contingent Valuation Method in the US, EU, and Developing Countries*, Oxford: Oxford University Press, 1999, pp. 403~491.
- Hanemann, W. M., "Welfare Evaluations in Contingent Valuation Experiments with Discrete Responses," *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 66, No. 3, 1984, pp. 332~341.
- Hanemann, W. M., J. Loomis, B. Kanninen, "Statistical Efficiency of Double-Bounded Dichotomous Choice Contingent Valuation," *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 73, No. 4, 1991, pp. 1255~1263.
- Herriges, J., J. Shogren, "Starting Point Bias in Dichotomous Choice Valuation with Follow-Up Questioning," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 30, 1996, pp. 112~131.

- International Agency for Research on Cancer, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Ionizing Radiation, Part 2: Some Internally Deposited Radionuclides*, Volume 78, 2001, IARC Press, Lyon: France.
- Jin, Y. W., S. Seo, "Radon and Lung Cancer: Disease Burden and High-risk Populations in Korea," *Journal of Korean Medical Sciences*, Vol. 33, No. 29, 2018, e210.
- Kim, J. H., M. Ha, "The Disease Burden of Lung Cancer Attributable to Residential Radon Exposure in Korean Homes," *Journal of Korean Medical Sciences*, Vol. 33, No. 29, 2018, e223.
- Kim, S. H., S. B. Koh, C. M. Lee, C. Kim, D. R. Kang, "Indoor Radon and Lung Cancer: Estimation of Attributable Risk, Disease Burden, and Effects of Mitigation," *Yonsei Medical Journal*, Vol. 59, No. 9, 2018, pp. 1123~1130.
- Kim, S. Y., Y. C. Kim, Y. Kim, W. H. Hong, "Predicting the Mortality from Asbestos-related Diseases Based on the Amount of Asbestos Used and the Effects of Slate Buildings in Korea," *Science of The Total Environment*, Vol. 542, Part A, 2016, pp. 1~11.
- Kim, Y., *An Economic Valuation of Environmental Risks from Residential Radon Radiation: A Choice Experiment and Contingent Valuation Study*, PhD. Thesis, Newcastle-upon-Tyne: University of Newcastle upon Tyne, 2004.
- Krewski, D., J. H. Lubin, J. M. Zielinski, M. Alavanja, V. S. Catalan, R. W. Field, J. B. Klotz, E. G. Létourneau, C. F. Lynch, J. I. Lyon, D. P. Sandler, J. B. Schoenberg, D. J. Steck, J. A. Stolwijk, C. Weinberg, H. B. Wilcox, "A Combined Analysis of North American Case-control Studies of Residential Radon and Lung Cancer," *Journal of Toxicology and Environmental Health*, Vol. 69, Part A, 2006, pp. 533~597.
- Lee, H. A., W. K. Lee, D. Lim, S. H. Park, S. J. Baik, K. A. Kong, K. Jung-Choi, H. Park, "Risks of Lung Cancer due to Radon Exposure among the Regions of Korea," *Journal of Korean Medical Science*, Vol. 30, No. 5, 2015, pp. 542~548.
- Lindhjem, H., S. Navrud, N. Braathen, *Valuing Lives Saved through Environmental, Transport and Health Policies: A Meta-analysis of Stated Preference Studies*, OECD, 2010.
- Lubin, J. H., Z. Y. Wang, J. D. Boice Jr, Z. Y. Xu, W. J. Blot, L. D. Wang, R. A. Kleinerman, "Risk of Lung Cancer and Residential Radon in China: Pooled Results of Two Studies," *International Journal of Cancer*, Vol. 109, 2004, pp. 132~137.

- National Academy of Sciences, *Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI*, Washington, DC: USA, National Academies Press, 1999.
- Park, E. J., H. Lee, H. C. Kim, S. S. Sheen, S. B. Koh, K. S. Park, N. H. Cho, C. M. Lee, D. R. Kang, “Residential Radon Exposure and Cigarette Smoking in Association with Lung Cancer: A Matched Case-Control Study in Korea,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, No. 8, 2020.
- UK Health Security Agency, *Radon Information for Householders*, Accessed November 21, 2022., <https://www.ukradon.org/sectors/householders>
- US Environmental Protection Agency, *A Citizen’s Guide to Radon*, 2016.
- US Environmental Protection Agency, *EPA Assessment of Risks from Radon in Homes*, EPA 402-R-03-003, 2003.
- US Environmental Protection Agency, *Health Risk of Radon*, Accessed November 17, 2022., <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>
- World Health Organization, “More Countries Act against Exposure to Radon and Associated Cancer Risks,” Accessed November 11, 2022a, <https://www.who.int/news/-tem/04-02-2021-more-countries-act-against-exposure-to-radon-and-associated-cancer-risks>
- World Health Organization, *Radon and Health*, Accessed October 16, 2022b., <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- World Health Organization, *WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective*, Geneva: Switzerland, WHO Press, 2009.
- Yoon, J. Y., J. D. Lee, S. W. Joo, D. R. Kang, “Indoor Radon Exposure and Lung Cancer: A Review of Ecological Studies,” *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 28, No. 1, 2016.