

피해비용 접근법을 바탕으로 한 소음비용 추정 연구

정동재 · 장수은*

서울대학교 환경대학원 환경계획학과

Valuing Traffic Noise Cost Based on the Damage Cost Approach

JUNG, Dongjae · CHANG, Justin S.*

Department of Environmental Planning, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

*Corresponding author: jsc@snu.ac.kr

Abstract

Traffic noise cost can be assessed either by the damage cost approach or by the avoidance cost method. This paper provides an overview of pertinent studies of these two approaches and shows that the damage cost approach is more universal and reliable than the avoidance cost counterpart. This study then investigated three sub-components to address the damage cost framework. First of all, unit value per person exposed to noise per year was calculated. Secondly, the area exposed to noise was determined using noise prediction equation. Thirdly, the number of people affected by noise was computed by multiplying the number of people exposed to noise with the percentage of people affected by noise. This paper also suggested a simplified equation that represents the relationship between damage costs and noise levels. Finally, the benefits of noise reduction derived from the damage cost method and those from the avoidance cost approach were compared and discussed.

Keywords: abatement costs, avoidance costs, damage costs, external costs, noise, transport appraisal

초록

교통 소음비용은 피해비용 접근법 또는 회피비용 접근법으로 평가할 수 있다. 본 연구는 피해비용 접근법을 바탕으로 소음의 외부비용을 산정하는 방안을 제시하였다. 이를 위하여 네 가지를 검토하였다. 첫째, 한국의 실정에 맞는 소음피해 비용 원단위 41,737-601,910 원/(인·년)를 도출하였다. 둘째, 소음도 예측식을 이용하여 소음 영향권을 설정하였다. 셋째, 소음 영향권 내에서 소음에 노출된 인구와 실제 피해인구 비율의 곱으로 소음피해 인구를 추산하였다. 마지막으로 소음의 피해비용을 산출하는 과정을 간소하게 하는 소음 피해비용과 소음도간 관계식을 제시하였다. 이를 바탕으로 피해비용 접근법과 회피비용 접근법으로 소음저감 편익을 산출하고 비교함으로써 피해비용 접근법이 회피비용 접근법보다 이론적 정합성과 정책적 신뢰성이 높은 방법론임을 확인하였다.

주요어: 완화비용, 회피비용, 피해비용, 외부비용, 소음, 타당성조사

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.4, pp.292-306, August 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.4.292>
pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 30 March 2017

Revised: 22 May 2017

Accepted: 12 July 2017

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

교통 활동은 교통사고, 혼잡, 소음, 대기오염 등 외부 효과를 수반한다. 교통사업의 타당성 평가, 교통가격의 설정, 사회적 비용의 내재화와 같은 교통정책 의사결정 단계에서 외부 효과를 고려하지 않으면 시장이 왜곡되고 자원 배분의 효율성이 떨어진다(Mankiw, 2011). 따라서 합리적인 교통정책 결정을 뒷받침하기 위해서 교통 활동에 따른 외부 효과를 화폐가치로 정량하는 방법론이 필수적이다. 이에 외부 비용을 평가하는 방법론에 관한 논의가 꾸준히 이루어졌고, 보편적 방법론에 대한 학계의 합의가 도출되고 있다(Bickel et al., 2006; Maibach et al., 2008; van Essen et al., 2011; Korzhenevych et al., 2014).

교통 활동의 외부 비용 중에서 교통 소음비용은 피해비용 접근법(Damage cost approach) 또는 회피비용 접근법(Avoidance cost approach)으로 평가할 수 있다. 최근에는 소음의 영향과 이를 계량하는 방식에 관한 정보가 축적되면서 소음에 의한 피해와 그에 따른 경제적 영향을 화폐가치로 평가하는 피해비용 접근법이 일반적으로 적용된다. 반면, 회피비용 접근법은 소음 피해를 일정 목표 수준으로 회피 또는 완화하기 위해 드는 비용으로 소음비용을 추산하는 방식으로, 완화비용(abatement or mitigation costs) 접근법이라고도 한다. 이 방법론은 관련 정보가 부족하거나 간이 분석을 할 때 유용할 수 있으나 후생경제학적 정합성이 떨어진다는 지적이 있다(Watkiss et al., 2005). 그러나 국내에서는 타당성 조사를 비롯한 소음비용 평가에서 회피비용 접근법만 고려되고 있다(KDI, 2008; MOLIT, 2013).

이에 본 연구는 피해비용 접근법에 기반을 둔 소음비용 평가 방법론을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 ‘선행연구’에서 환경 영향의 외부 비용을 평가할 때 주로 쓰는 피해비용 접근법과 회피비용 접근법을 비교하고, 국내·외 적용 사례를 검토한다. 특히 피해비용 접근법이 회피비용 접근법보다 소음비용 평가에 보편적으로 적용되는 방법임을 논의한다. ‘피해비용 접근법’에서는 한국의 실정에 맞는 소음 피해비용 원단위를 도출하고, 소음 피해 영향권을 설정하는 방식과 소음에 실제로 피해를 입는 인구를 추산하는 방법을 제안한다. 또한 소음 피해비용을 추정하는 방안을 제시한다. 이어서 ‘토론’에서 피해비용 접근법과 회피비용 접근법으로 소음저감 편익을 산출하고 비교하면서 두 방법론의 특징을 검토한다. 마지막으로 ‘결론’은 연구 내용을 요약하고 향후 연구과제를 정리한다.

선행연구

소음비용은 피해비용 접근법으로 추정하는 것이 일반적이다. 피해비용 접근법은 비교적 많은 정보와 과정이 요구되지만, 이미 상당히 축적된 정보를 바탕으로 영국(UK DfT, 2014), 독일(Birn et al., 2005), EU(Maibach et al., 2008; Korzhenevych et al., 2014), UIC(van Essen et al., 2011) 등 여러 국가와 기관에서 활용되고 있다(Table 1 참조). 독일 FTIP 2003(Birn et al., 2005)는 피해비용 접근법과 회피비용 접근법을 함께 쓰고 있으나, 회피비용 접근법은 인구밀도가 낮고 피해 인구가 적은 비시가지에 국한하여 적용되고 있다. 반면, 국내의 교통시설 투자평가 지침(KDI, 2008; MOLIT, 2013)에서는 방음벽 설치비용으로 소음비용을 대체 추산하는 회피비용 접근법을 따르고 있다. 즉, 특정 단일 지점의 소음도 저감 목표치에 소음도 1dB을 낮추기 위해 드는 km당 방음벽 설치비용, 교통시설 연장을 곱해서 소음비용을 추산한다. 회피비용 접근법은 적용하기가 쉽지만, 소음에 노출된 인구의 피해를 고려하지 못한다.

Table 1. Literature review

Methodology	Studies	Values	Units	Cost elements	Thresholds
Damage cost approach	TAG (UK DfT, 2014)	10.91–127.24	£2010 per household per dB per annum	Annoyance costs	45dB(A)
	HEATCO (Bickel et al., 2006) ^a	7.3–315.4	€2002 per person per annum	Annoyance costs Health costs	50dB(A) 70dB(A)
	EU (Maibach et al., 2008)	Updated values from Bickel et al. (2006)	€2002 per person per annum	Annoyance costs Health costs	50dB(A) 70dB(A)
	UIC (van Essen et al., 2011)	Updated values from Bickel et al. (2006)	€2008 per person per annum	Annoyance costs Health costs	55dB(A) 70dB(A)
	EU (Korzhenyevych et al., 2014)	Updated values from Bickel et al. (2006)	€2010 per person per annum	Annoyance costs Health costs	55dB(A) 70dB(A)
Avoidance cost approach	KDI (2008)	Urban: 3,739 Rural: 1,614 Total: 1,903	₩2007 per dB per m per annum	Costs for building noise barriers	Urban: 55dB Rural: 45dB
	MOLIT (2013)	Urban: 4,308 Rural: 1,860 Total: 2,193	₩2011 per dB per m per annum	Costs for building noise barriers	Urban: 55dB Rural: 45dB
Mixed approach	Germany FTIP 2003 (Birn et al., 2005)	Built-up areas: 54.71	€1998 per person per annum	Annoyance costs	37dB(A) (nighttime)
		Outside built-up areas: 310–3,680	€1998 per km per annum	Costs for building noise barriers	62dB(A)

^aValues are the average of 26 countries.

피해비용 접근법

소음의 피해비용은 인간이 받는 소음 피해를 화폐가치로 환산한 것이다. 소음 피해비용을 추정하기 위해서는 소음도, 소음 피해비용 원단위, 소음 피해인구에 관한 정보가 필요하다.

1. 소음도

소음도는 현장에서 측정하는 것이 원칙이지만 비용이나 시간에 제약이 있어서 실측이 어렵거나, 가상의 교통상황에 대해 분석할 경우에는 소음도 예측식을 활용할 수 있다. 예로써 교통사업의 환경영향평가, 타당성조사(KDI, 2008; MOLIT, 2013), 방음시설 설계(MOLIT, 2012) 등에서 NIER(1987)의 일반도로 소음도 예측식과 한국도로공사의 고속도로 소음도 예측식(HW-NOISE)이 적용되고 있다. 먼저 NIER(1987)의 일반도로 소음도 예측식은 Equation 1과 같다.

$$L_{eq} = 1.1 \left[20 + 10 \log \left(\frac{QV}{g} \right) \right] - 9 \log \gamma_{\alpha} + C, \quad (1)$$

여기서, L_{eq} : 등가소음도(dB)

Q : 등가교통량(대/시)

V : 평균차속(km/시)

g : 가상주행 중심선에서 도로단 밖 기준거리 지점까지 거리(m)

γ_a : 기준 거리 10m에 대한 도로단에서 수음점까지 거리의 비율(즉, $\gamma_a = (\text{이격거리} - \text{도로폭})/10$)
 C : 교통량에 따른 상수

한국도로공사의 고속도로 소음도 예측식은 Equation 2와 같다.

$$L_{eq} = PWL + 10 \log \frac{1}{2ds} + \Delta L_i + a_d + a_i, \quad (2)$$

여기서, $PWL = 72.4 + 20 \log V + 10 \log (a_1 + 3.8a_2)$

a_1 과 a_2 : 각각 소형차(소형버스, 중소형 트럭 포함) 혼입율, 대형차 혼입율

d : 음원(도로단)에서 수음점까지 거리(이격거리, m)

s : 평균차두간격(m/대)

ΔL_i : 종단구배의 보정치

a_d : 방음시설에 의한 회절의 보정치

a_i : 지표조건과 같은 여러 원인에 의한 보정치

한편, 국내 교통시설 타당성 조사에 적용되는 철도교통 소음도 예측식은 일반, 광역철도와 고속철도로 구분된다 (KDI, 2008; MOLIT, 2013). 먼저 일반, 광역철도의 소음도 예측식은 Equation 3과 같다.

$$L_{eq} = \overline{L_{\max}} + 10 \log \left(\frac{n T_e}{T} \right) - 15 \log \gamma_\alpha, \quad (3)$$

여기서, $\overline{L_{\max}}$: 개별 열차 통과시 최고 소음도(dB)

n : 관련시간대의 열차 통과대수(회)

T_e : 열차 1대당 최고 소음도 지속시간 또는 열차 유효 통과시간(초)

T : 관련시간대의 길이(초)

γ_α : 기준거리에 대한 예측거리의 비

$\overline{L_{\max}}$ 는 Kang(1997a, 1997b)에서 제시된 열차종류별 기준거리 7.5m에서 최고 소음도 $\overline{L_{\max}}$ 와 평균 운행속도 V (km/h)의 관계식으로 추정한다. 고속철도의 등가소음도 예측식은 Equation 4와 같다.

$$L_{eq} = \overline{L_{\max}} + 10 \log \left(\frac{n T_e}{T} \right), \quad (4)$$

여기서, $\overline{L_{\max}} = 80 + 28 \log \left(\frac{V}{100} \right) - 14 \log \left(\frac{d}{25} \right)$

d : 선로에서 수음점까지 거리(m)

2. 소음 피해비용 원단위

소음 피해비용 원단위는 소음에 의한 피해를 화폐가치로 계량한 것이다. 소음에 의한 피해는 크게 성가심(annoyance)과 건강 위해로 구분한다(UK DfT, 2014; Bickel et al., 2006; Maibach et al., 2008; van Essen et al., 2011; Korzhenevych et al., 2014). 성가심 피해는 소음으로 인한 생활 활동의 제약, 생산성 저하, 심리적 불편함 등이며 소음도가 45-55dB(A) 이상일 때 발생한다(Table 1 참조). 성가심 피해의 화폐가치는 소음의 영향을 줄이기 위한 지불의사액으로 평가할 수 있으며, 지불의사액은 주로 현시선호 기법에 기반을 둔 헤도닉 가격법(Chang and Kim, 2013; Bateman et al., 2004; Bickel et al., 2003; Schreyer et al., 2004) 또는 진술선호 기법을 바탕으로 하는 조건부 가치추정법(Navrud, 2002; HSEA, 2003(Bickel et al., 2006에서 재인용))으로 추정한다. 한편, 건강 위해는 70dB(A) 이상의 소음에 오랜 시간 노출되어 나타나는 스트레스 반응(심장박동, 혈압, 호르몬 변화 등), 심혈관질환, 사망률 증가 등을 의미한다. 건강 위해 비용은 실제 의료 가격과 생명 가치를 활용하여 산출한다.

그런데 교통소음의 피해비용 원단위에 관하여 국내에서 이루어진 연구는 충분하지 않다. 부족한 국내 연구 결과와 논의로는 소음 피해비용 원단위의 대푯값을 결정하기 어렵다. 피해비용 원단위에 대한 개별 연구의 신뢰성을 논의하는 것 또는 비용 원단위를 직접 추정하는 것은 본 연구의 범위를 벗어나는 별도의 연구 주제이다. 이에 본 연구에서는 이미 신뢰성이 검증된 국외의 피해비용 원단위를 국내 실정에 맞게 이전하고자 한다. 이전 대상은 EU(Maibach et al., 2008; Korzhenevych et al., 2014), UIC(van Essen et al., 2011) 등 공신력 있는 국제기구가 검증, 차용한 HEATCO(Bickel et al., 2006)의 피해비용 원단위로서 유럽의 26개 국가별로 성가심 비용과 건강위해 비용을 1dB 단위로 추정한 것이다.

이전 방법으로는 가치이전법과 함수이전법을 고려할 수 있다. 가치이전법은 이전하고자 하는 대상지와 가장 유사한 곳에서 평가된 원단위를 그대로 적용(점추정치 이전)하거나, 여러 연구 결과의 평균, 중앙값 등의 대푯값을 활용(대푯값 이전)하는 방법이다. 이 방법은 적용이 간단하고 쉽지만, 단일 원단위는 대표성이 부족할 수 있고, 대푯값은 이상치의 영향을 크게 받을 수 있다. 함수이전법은 선행 연구에서 추정한 함수에 분석 대상지의 특성을 대입하여 분석 대상지의 원단위를 도출하거나, 선행 연구의 결과와 중요 인자간의 관계를 밝혀서 분석 대상지의 원단위를 추정하는 방법이다. 함수이전법은 분석 대상지의 특성을 고려하여 원단위를 조정할 수 있고, 이상치에 덜 민감한 대푯값을 도출할 수 있어서 가치이전법보다 신뢰도가 높다(Ahn and Rho, 2007; 5-10).

본 연구는 함수이전법을 활용하여 피해비용 원단위를 도출한다. 그 이유는 첫째, 이전하고자 하는 피해비용 원단위가 국가별로 편차가 크기 때문이다. 예컨대 소음도 50-55dB에 대한 피해비용 원단위는 최소 €4.8/(인·년)에서 최대 €45.4/(인·년)로 나타난다. 둘째, 피해비용 원단위는 국가별 소득, 문화, 제도 등 분석 대상지의 특성에 따라 달라질 수 있다(Bickel et al., 2006). 특히, 소음 피해비용 중에서 성가심 비용이 차지하는 비중이 일반적으로 높고(Bickel et al., 2003; Maibach et al., 2008) 성가심 비용은 소음피해를 줄이기 위한 지불의사액으로 추정되는 것을 고려하면, 피해비용 원단위는 소득 수준과 상관관계가 클 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 국가별 피해비용 원단위와 1인당 GDP의 관계식을 추정하고, 이 식에 한국의 1인당 GDP를 대입함으로써 한국의 피해비용 원단위를 도출한다.

Table 2는 HEATCO(Bickel et al., 2006)의 국가별 1dB별 소음 피해비용 원단위를 5dB 간격으로 평균한 값을 종속변수(€/인·년)로 설정하고, 국가별 1인당 GDP(USD 1,000)를 독립변수로 적용한 선형 회귀식을 추정한 결과이다. 피해비용 원단위를 1dB 단위로 모형 추정하면 피해인구도 피해비용 원단위와 같은 집계단위인 1dB 간격으로 산출해야 하는 어려움이 있다. 또한 측정오차도 커질 수 있다. 본 연구와 같이 소음도 수준을 묶어 계단형 함수로 설정하는 것이 현실적인 대안이다. 5dB 간격의 7개 회귀식에서 1인당 GDP의 계수 부호는 모두 양(+)이고, 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하다. 이는 소득 수준이 높을수록 소음 피해를 줄이기 위한 지불의사액이 큰 것을 의미하므로 직관에 부합한다. 또한 7개 회귀식의 F 통계량은 모두 유의수준 1%에서 유의하고, R^2 는 약 0.94로서 1인당 GDP로 피해비용 원단위의 분산을 94%가량 설명한다. 이처럼 모형의 적합도는 양호한 수준이다. 일부 설명되지 않은 분산은 소득 수준 외에 포함되지 않은 변수의 영향으로 판단되나, 이에 대한 추가 검토는 향후 연구과제로 남긴다.

Table 2. Estimation results of regression models (EU countries)

	Noise levels (dB)						
	50–55	55–60	60–65	65–70	70–75	76–80	≥81
Constant	2.0469**	5.4056**	8.8687**	12.3303**	20.4398**	26.1197**	29.5222**
GDP per capita (1000 USD)	0.9936*	2.6493*	4.3026*	5.9547*	9.8909*	12.6626*	14.3285*
<i>F</i> statistic	362.72*	369.96*	368.38*	370.28*	368.47*	369.20*	369.37*
<i>R</i> ²	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94

‘*’ and ‘**’ indicate 1% and 10% significance level respectively.

Table 2의 피해비용 원단위와 1인당 GDP의 관계를 토대로 한국의 소음 피해비용 원단위를 추정하면 Table 3과 같다. 소음 피해비용 원단위는 소음도 50–55dB에서 최소 41,737 원/(명·년), 소음도 81dB 이상에서 최대 601,910 원/(명·년)으로 나타난다. 소음도 70–75dB에서 피해비용이 크게 증가하는 이유는 소음도 70dB 이상부터 건강 위험이 발생하기 때문이다. 한편, 철도교통의 소음비용 원단위는 도로교통의 소음비용 원단위보다 낮은 이른바 철도 보너스(rail bonus)를 적용한다. 철도교통의 소음은 같은 수준의 도로교통 소음보다 적은 피해를 유발하기 때문이다 (Birn et al., 2005; Bickel et al., 2003; Bickel et al., 2006; Maibach et al., 2008; van Essen et al., 2011). 본 연구도 학계의 이러한 통상적 권고와 절차를 수용하여 철도교통의 피해비용 원단위는 도로교통의 피해비용 원단위보다 한 단계 낮은 값으로 적용한다.

Table 3. Values of noise externality for Korea (wons per person per year, 2014 prices)

Noise levels (dB)	Road	Rail
50–55	41,737	–
55–60	111,219	41,737
60–65	180,747	111,219
65–70	250,231	180,747
70–75	415,581	250,231
76–80	531,971	415,581
80+	601,910	531,971

3. 소음 피해인구

소음에 노출된 인구와 피해를 입은 인구를 산출하기 위해서 우선 소음 영향권을 설정해야 한다. 소음 영향권은 소음도가 기준(즉, 소음피해 임계 소음도)보다 높아서 소음피해가 발생하는 지역이다. 본 연구는 최근 UIC(van Essen et al., 2011), EU(Korzhenevych et al., 2014) 등에서 적용된 소음피해 임계 소음도 55dB(A)를 기준으로 그 이상 지역을 소음 영향권으로 설정한다. 또한 소음도에 따라 피해 정도가 다른 것을 반영하기 위해서 소음 영향권을 피해비용 원단위 산정에서와 마찬가지로 5dB 간격으로 구분하고, 각 소음도 수준은 k ($k=1$ if 80+dB, $k=2$ if 75–80 dB, ..., $k=6$ if 55–60 dB)로 표기한다.

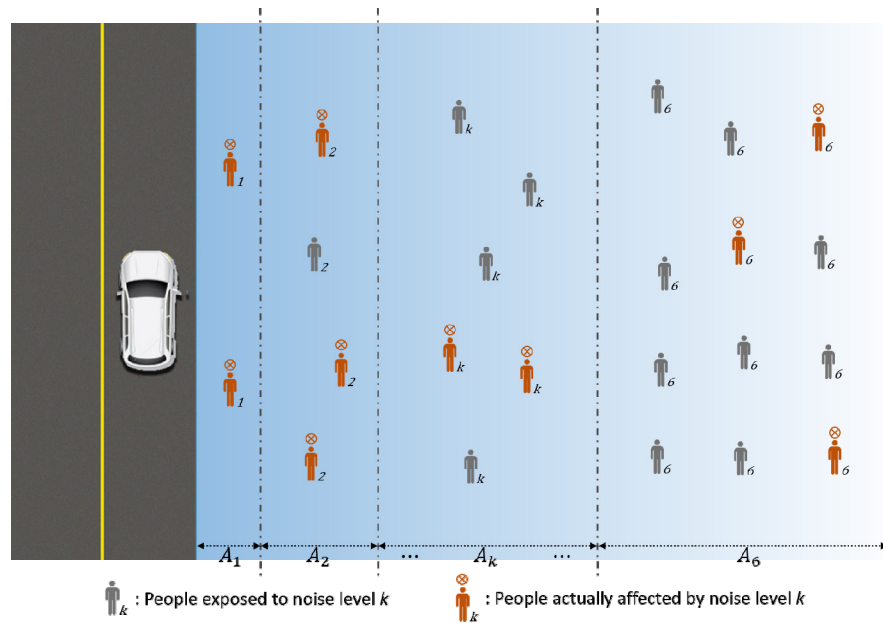


Figure 1. Conceptual diagram for total people exposed to and those actually affected by noise level k

Figure 1에서 소음도 수준 k 별 영향권의 경계는 5dB 간격의 소음도, 즉 80, 75, 70, 65, 60, 55dB(A)가 측정되는 지점이다. 소음원에서 각 경계지점까지 거리는 소음의 기하학적 확산 즉, 거리에 따른 소음도 감쇠뿐만 아니라 지표면의 흡음, 구조물에 의한 회절, 대기(풍속, 온도, 습기 등)에 의한 음에너지 손실을 고려하여 측정되어야 한다. 그러나 분석 지점과 시점에 따라 지표면, 구조물, 대기 등의 상태는 일정하지 않고, 이를 본 연구에서 모두 고려하는 것은 어렵다. 이에 본 연구에서는 소음도 예측식 Equation 1-4를 소음원에서 수음점까지 거리에 대한 식으로 정리(즉, 소음도 예측식에서 좌항에는 거리만 두고, 소음도를 포함한 파라미터를 모두 우항으로 이항)하고, 이 식에 5dB 간격의 소음도와 도로 링크별 또는 철도 선구별 교통조건을 대입함으로써 도로 링크별 또는 철도 선구별로 소음원에서 각 경계 지점까지 거리를 역산한다. 또한 인접한 두 경계지점의 거리를 이용해 영향권의 너비 A_k (Figure 1 참조)를 도출한다.

도로부문의 링크별 소음 영향권을 설정할 때 필요한 정보, 즉 Equation 1과 Equation 2의 입력값 중에서 교통량과 속도는 KTDB(2013년 전국권 기준) 네트워크에 배정(assignment)된 링크별 교통량과 속도 결과를 활용한다. 교통량과 속도 자료의 신뢰도를 높이기 위해서 전체 링크를 도로위계(지방부/도시부, 고속도로/일반도로, 차로수, 일반도로의 경우 km당 교차로수 등)에 따라 구분하고, 어느 링크의 교통량 또는 속도가 해당 링크가 속한 도로위계의 평균 교통량 또는 평균 속도와 $\pm 2\sigma$ (표준편차) 초과 차이가 나면 이상 링크로 간주하여 분석에서 제외하였다. 한편 교통량, 속도 외 소음도 예측식에 요구되는 파라미터는 KDI(2008)에 제시된 값을 적용하였다. Table 4는 각 링크의 소음도 수준별 영향권 너비 A_k 를 고속도로, 일반도로로 구분해서 평균한 것이다. 일반도로에 비해 교통량이 많고 속도가 빠른 고속도로에서 소음 영향권이 넓게 형성된다.

Table 4. Average A_k for road link by road type and noise level

	Noise levels (dB)					
	80+	75-80	70-75	65-70	60-65	55-60
Highways	0.000	0.000	0.003	0.962	8.358	33.505
Expressways	4.986	20.297	70.895	228.991	724.731	2,291.799
Total	0.628	2.555	8.928	29.669	98.546	317.813

철도부문의 선구별 소음 영향권을 설정할 때 필요한 정보, 즉 Equation 3과 Equation 4의 입력값 중에서 철도 선구 i 별 열차종 j 별 1일 운행횟수 $F_{i,j}$ 는 2014년 철도통계연보의 ‘선구별, 열차종별 운행횟수 자료’를 사용한다. 이 외의 변수는 KDI(2008)를 준용하여 $n_{i,j} = F_{i,j} \div H$, $T_{e,j} = 720 \div V_j$, $T_{i,j} = 3600 \times n_{i,j} \div \sum_j n_{i,j}$ 로 적용한다. 여기서, 파라미터인 영업시간 H (시)는 18시간(단, 광역철도는 19시간)을, 열차종 j 별 운행속도 V_j (km/h)는 노선별 영업거리와 열차운행시각표의 소요시간으로 도출한 값¹⁾을 적용한다.

대부분의 철도 선구에서 여러 종류의 열차가 운행되는데 각 선구의 소음 영향권은 해당 선구에서 소음 영향권을 가장 크게 형성하는 열차종류를 기준으로 설정한다. Table 5는 98개 선구의 소음도 수준별 영향권 너비 A_k 을 평균한 것이다.

Table 5. Average A_k for rail link by noise level

Noise levels (dB)					
80+	75-80	70-75	65-70	60-65	55-60
0.12	1.97	7.70	19.66	44.76	97.28

도로 링크 또는 철도 선구 i 별 소음 영향권이 설정되면 소음에 피해를 입은 인구 P_i (명)를 산정한다. 소음에 피해를 입은 인구는 소음 영향권 내에서 소음에 노출된 인구와 실제 피해인구 비율 θ (%)의 곱으로 추산할 수 있다. 여기서, 소음에 노출된 인구는 소음도 수준 k 의 영향권 면적(km^2)과 인구밀도 $D_{i,k}$ (명/ km^2)의 곱으로 도출하는데, 소음도 수준 k 의 영향권 면적은 링크(또는 선구) i 의 연장 l_i (km)와 해당 링크(또는 선구)의 소음도 수준 k 의 영향권 너비 A_k 의 곱으로 추정할 수 있다. 이를 정리하면 소음도 수준 k 에 피해를 입은 인구 $P_{i,k}$ 는 Equation 5와 같다.

$$P_{i,k} = \frac{l_i}{1000} A_{i,k} D_{i,k} \theta_k \quad (5)$$

한편 본 연구는 링크 주변의 인구밀도는 균질한 것으로 가정한다. 즉, $D_{i,k} = D_i$ 로 적용한다. 또한 소음도 수준 k 의 피해인구 비율 θ_k 는 공신력 있는 국내 실측 자료가 없으므로 선행연구 결과를 활용한다. 예컨대 HEATCO(Bickel et al., 2006)는 European Commission(2002)의 소음 반응 함수(dose response functions)를 이용하여 소음에 노출된 전체 인구 중에서 피해를 입는 성인 인구의 비율을 도출하였다. 어린이가 소음 피해에 취약한 계층인 것(Maibach et al., 2008)을 고려하면, HEATCO(Bickel et al., 2006)의 성인 기준 피해인구 비율은 과소추정에 주의해서 적용해야 한다. 한편 가장 최근에 발표된 UK DfT(2014)는 DMRB(UK Highways Agency, 2011)의 소음 반응 함수로 전체 인구를 기준으로 소음에 민감하게 반응하는 인구 비율을 1dB, 3dB 간격으로 각각 제시하였다. 본 연구는 전체 인구를 기준으로 피해 인구 비율을 도출한 UK DfT(2014)의 결과를 Table 6과 같이 5dB 간격으로 재산정하여 적용한다.

1) 고속철도는 150km/h, 무궁화호와 새마을호는 85km/h, 통근열차와 광역전철은 65km/h, 화물철도는 60km/h로 적용함. 고속철도와 일반철도의 속도 산출에 쓰인 소요시간은 코레일의 2016년 3월 기준 열차운행시각표의 통행시간에서 정차역별 정차시간 2분을 감한 통행시간을 사용함. 고속철도는 하행 1일 기준 총 142회 열차 운행의 각 기종점별 영업거리와 소요시간으로 평균속도를 구하면 150.9km/h임. 같은 방식으로 도출한 무궁화호, 새마을호, 통근열차의 평균속도는 각각 83, 82, 64km/h임. 광역전철은 11개 광역전철 노선의 총 영업거리와 총 소요시간 통계(2013년 서울도시철도 수송계획,참조)로 평균속도 67.4km/h를 산출함. 이때 총 소요시간은 정차역별 정차시간 1분을 감한 값임. 한편, 화물열차의 평균속도에 대한 정보는 구득이 어려워서 고속철도, 일반철도 등 다른 열차종류의 평균속도(A)와 영업최고속도(B)의 평균 비율 0.57(A/B)을 화물철도의 영업최고속도 110km/h에 곱함으로써 평균속도를 62km/h로 유추함.

Table 6. Percentage of people affected by noise (θ_k)

Noise levels (dB)	Percentage of people affected (%)
50–55	7.77
55–60	13.30
60–65	21.80
65–70	33.60
70–75	47.87
76–80	65.24
80+	72.98

source: UK DfT (2014).

4. 소음 피해비용

링크(또는 선구) i 의 소음 피해비용 C_i (원/년)은 Equation 6과 같이 소음도 수준 k 별 피해인구 $P_{i,k}$ (Equation 5 참조)와 피해비용 원단위 $U_{i,k}$ 의 곱을 k 에 대해 모두 합한 값이다.

$$C_i = \sum_{k=1}^6 U_{i,k} P_{i,k} = \frac{l_i D_i}{1000} \sum_{k=1}^6 A_{i,k} \theta_k U_{i,k}. \quad (6)$$

단위 연장당 링크(또는 선구) i 의 소음 피해비용 C'_i (원/(km·년))은 Equation 6을 l_i 로 나눈 값으로서 Equation 7과 같다.

$$C'_i = \frac{D_i}{1000} \sum_{k=1}^6 A_{i,k} \theta_k U_{i,k} = D_i M_i. \quad (7)$$

$$\text{여기서, } M_i = \frac{1}{1000} \sum_{k=1}^6 A_{i,k} \times \theta_k \times U_{i,k}.$$

본 연구는 지금까지 정리한 방식으로 도로 링크와 철도 선구의 C'_i 를 산출하였다. 다시 말하여, 전국 링크(또는 선구)의 소음 영향권을 측정하고 각 링크의 영향권 내에서 실제 소음피해를 입는 인구를 산출한 후, 인구와 피해비용 원단위의 곱으로 C'_i 를 도출하였다. 그리고 Equation 7에서 인구밀도를 제외한 부분 즉, M_i 는 Equation 8과 같이 해당 링크(또는 선구) i 의 기준거리(도로는 10m, 철도는 7.5m)에서 측정되는 소음도 L_i 에 대한 식으로 근사할 수 있음을 발견하였다.

$$\log M_i = \alpha + \beta \log L_i + \varepsilon_i, \quad (8)$$

여기서, 소음도 L_i 는 M_i (또는 Equation 5–7의 A)를 산출하는데 사용된 소음도 예측식(Equation 1–4 참조)으로 도출하였다. 또한, α 와 β 의 추정치는 Table 7과 같다. 계수 추정치는 모두 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하고, β 의 부호는 예상대로 양(+)으로 추정되었다. 도로, 철도 부문 두 추정식의 F 통계량은 모두 유의수준 1%에서 유의하고 R^2 는 각각 0.972, 0.993으로 모두 설명력이 높다. 따라서 Equation 9의 \hat{C}'_i 는 Equation 7의 C'_i 를 산출하는 과

정, 즉 소음도 수준별 영향권 설정, 소음 영향권 내 피해인구 추산, 영향권별 소음 피해비용 추정과 합산 과정을 무리 없이 간소하게 하고 합리적인 결과를 제공한다.

$$\widehat{C}_i' = D_i \widehat{M}_i \quad (9)$$

여기서, \widehat{M}_i 는 M_i 의 추정치로서 Equation 8의 추정 결과로 도출한다.

Table 7. Estimation results for Equation 8

		Road	Rail
Coefficients (<i>t</i> statistic)	α	-32.118 (-1,167.29)*	-30.728 (-105.179)*
	β	19.585 (1,275.076)*	18.153 (115.919)*
R^2		0.972	0.993
F statistic		1,625,819.06*	13,437.24*

*: indicates the 1% significance level.

토론: 피해비용과 회피비용 접근법의 소음저감 편익 비교

본 장에서는 피해비용 접근법과 회피비용 접근법으로 소음저감 편익을 산출하고 비교함으로써 두 방법론의 특징을 검토한다. 비교 방법으로 두 가지를 고려할 수 있다. 첫째, 어느 교통사업을 대상으로 사업 시행에 따른 소음저감 편익을 두 방법론으로 추정하고 비교하는 것이다. 둘째, 어느 소음 수준, 인구밀도 조건에서 소음도 1dB이 저감될 때 소음저감 편익을 두 방법론으로 산출해 비교하는 것이다. 그런데 첫 번째 방식은 많은 교통사업의 결과를 비교해야 신뢰할 수 있는 시사점을 얻을 수 있다. 교통사업이 시행되는 지역에 따라 기본 소음 수준, 인구밀도, 교통시설 공급과 수요 수준 등이 다르므로 각 조건을 통제할 수 있을 만큼 표본이 필요하기 때문이다. 따라서 본 연구는 두 번째 방법을 바탕으로 두 방법론의 특징을 비교한다.

소음저감 편익은 소음도 감소에 따른 소음비용 절감분이다. 소음도 L 에서 1dB 저감에 따른 소음비용 절감분 $\Delta C'_L$ 은 소음도 L 과 $L-1$ 에서의 각 소음비용 C'_L 과 C'_{L-1} 의 차이 즉, Equation 10과 같다.

$$\Delta C'_L = C'_L - C'_{L-1}. \quad (10)$$

따라서 피해비용 접근법의 소음도 L 에서 1dB 저감에 따른 소음비용 절감분 $\Delta C'_{\text{damage}, L}$ 은 Equation 7과 Equation 10에 의해 Equation 11과 같다.

$$\Delta C'_{\text{damage}, L} = D (M_L - M_{L-1}). \quad (11)$$

본 연구에서는 인구밀도 D 를 각 링크(또는 선구)가 속한 행정구역의 값을 적용하였다. 단, 인구밀도는 2014년 기준 강원도 89 명/㎢에서 서울특별시 16,343 명/㎢까지 행정구역별로 상당한 편차가 있고, 동일 행정구역 내에서도 지역에 따라 다를 수 있음을 유의해야 한다. 따라서 분석의 범위나 요구되는 정확도 수준에 따라 인구밀도의 집계 단위를 조정해야 한다.

한편, 회피비용 접근법의 소음도 L 에서 소음 비용 C'_L 은 소음도 L 와 회피비용 원단위 B_L 의 곱으로 산출한다. 따라서 소음도 L 에서 1dB 저감에 따른 소음비용 절감분 $\Delta C'_{\text{avoidance}}$ 은 Equation 10에 의해 Equation 12와 같다.

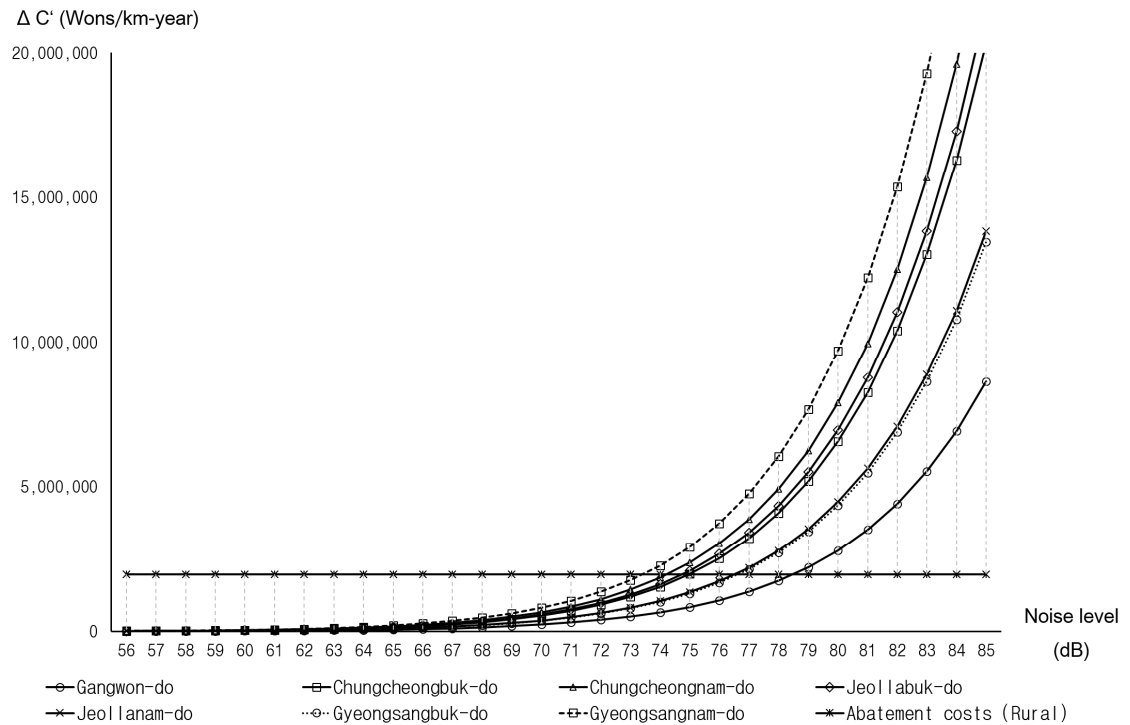
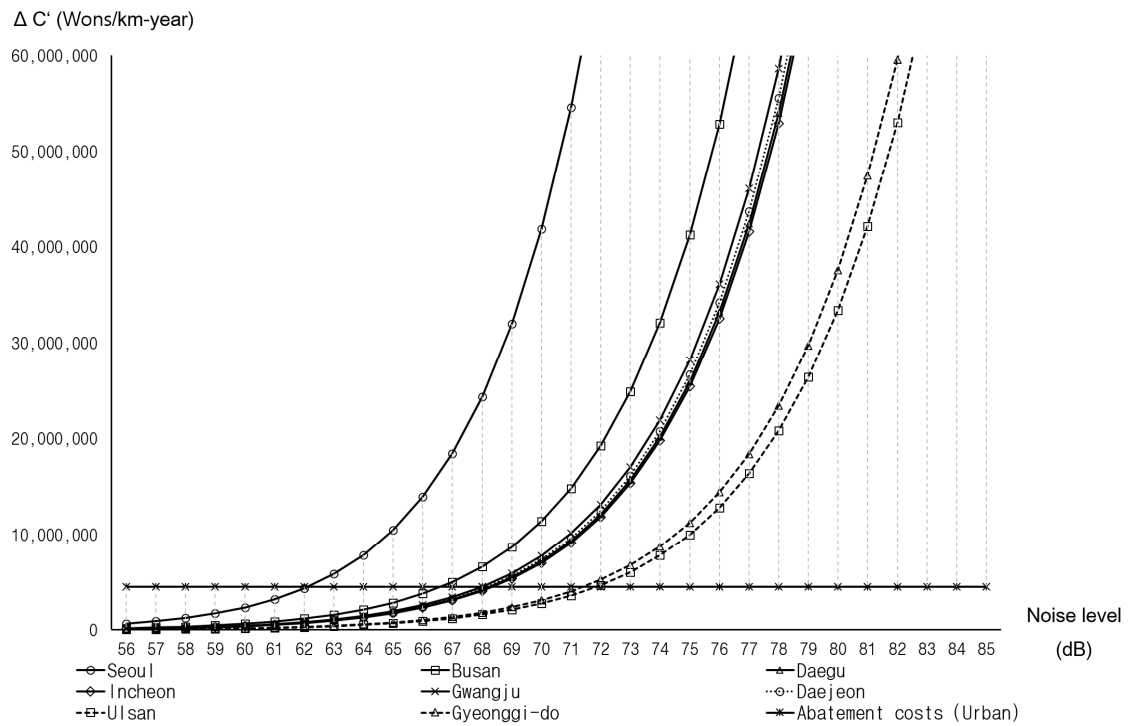


Figure 2. Benefits of one dB change in road noise level by region (wons per km per annum, 2014 prices)

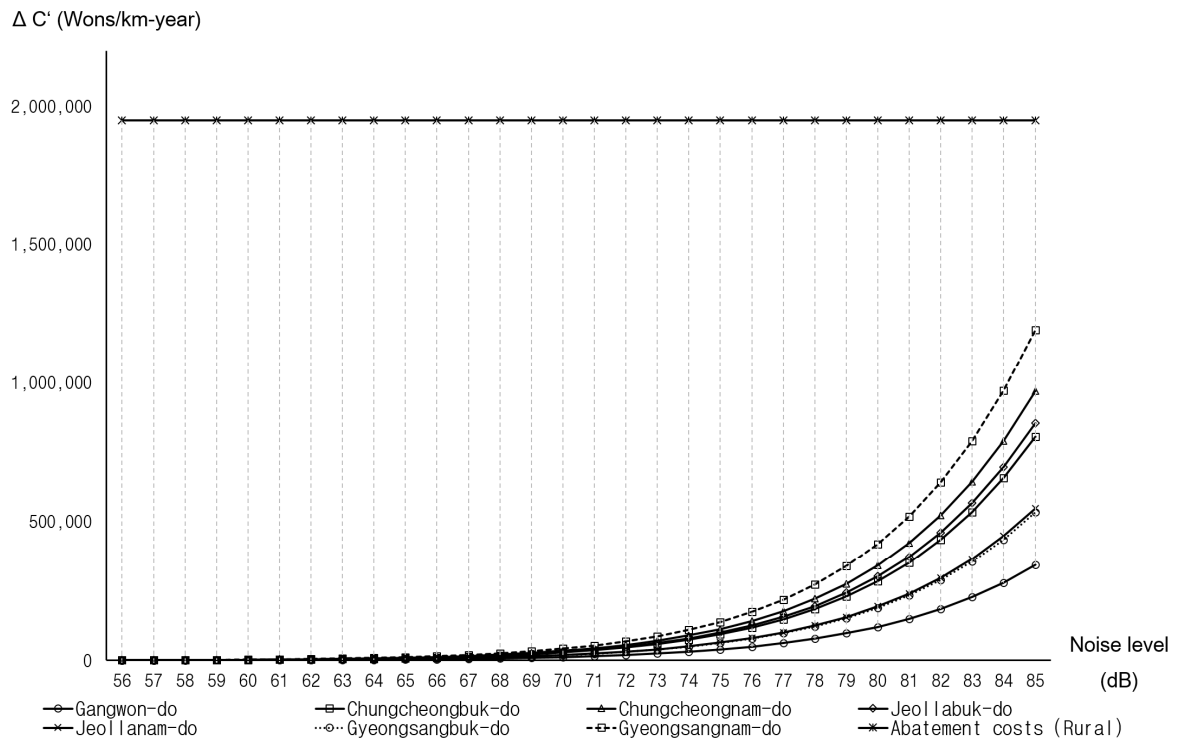
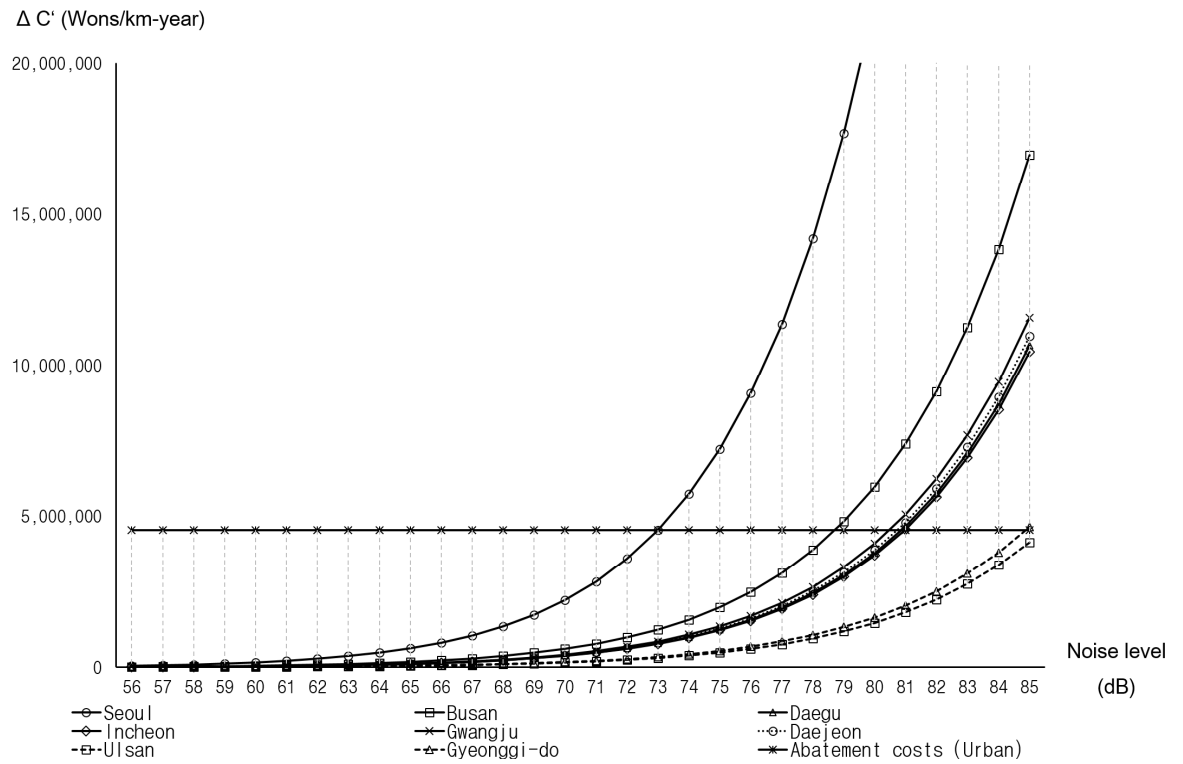


Figure 3. Benefits of one dB change in rail noise level by region (wons per km per annum, 2014 prices)

$$\Delta C'_{avoidance, L} = L B_L - (L-1) B_{L-1}. \quad (12)$$

그런데 국내에서 일반적으로 적용되는 KDI(2008)의 회피비용 원단위 B 는 도시부, 지방부로 구분될 뿐 소음 수준과 관계없이 하나의 값이 적용된다. 즉, $B_L = B_{L-1}$ 이다. 따라서 회피비용 접근법에서 도시부, 지방부의 1dB 저감에 따른 소음비용 절감분 $\Delta C'_{avoidance}$ 은 각각 회피비용 원단위 그 자체 값인 4,514,956 원/(dB·km·년), 1,948,954 원/(dB·km·년)이 된다. 이 값은 2007년 기준 회피비용 원단위를 소비자 물가지수를 이용해 2014년 기준 가격으로 보정한 것이다.

Figure 2와 3은 이상의 과정에 따라 도로와 철도의 소음도 1dB 저감에 따른 소음비용 절감분을 나타낸 것이다. X 축은 소음도 L , Y 축은 X 축의 해당 소음도 L 에서 1dB이 저감될 때 소음비용 절감분 $\Delta C'_L$ 을 의미한다. 각 그림에서 위쪽은 서울, 경기 및 6개 광역시의 피해비용 절감분과 도시부 회피비용 절감분을, 아래쪽은 7개 광역도의 소음 피해비용 절감분과 지방부 회피비용 절감분을 비교한다. Y 축인 소음비용 절감분이 지역별로 차이가 커서 한 번에 비교하는 것이 어렵기 때문에 그림을 구분하였다.

Figure 2와 3에서 중요한 시사점 세 가지를 정리할 수 있다. 첫째, 회피비용 접근법은 기준 소음도와 관계없이 저감된 소음도가 같으면 소음저감 편익을 동일한 값으로 평가한다. 예를 들어 소음수준이 55dB에서든 85dB에서든 1dB 저감에 따른 편익은 동일하다. 반면 피해비용 접근법은 기준 소음도가 높을수록 소음저감 편익이 한계체증하는 합리적인 결과를 도출한다. 둘째, 피해비용 접근법은 인구밀도를 고려할 수 있다. 즉, 인구밀도가 높은 지역일수록 1dB 저감에 따른 편익이 크다. 이는 직관과 상식에 부합한다. 마지막으로, 회피비용 접근법은 사업의 특성에 따라 소음 저감편익을 과대 또는 과소 평가할 수 있다. 높은 소음도 수준에서는 소음저감 편익을 과소 추정하고, 낮은 소음도에서는 소음저감 편익을 과대 추정하기 때문이다.

결론

교통 소음비용은 피해비용 접근법 또는 회피비용 접근법으로 평가할 수 있다. 최근에는 소음의 영향과 이를 계량하는 방식에 관한 정보가 축적됨에 따라 소음에 의한 피해와 그에 따른 경제적 영향을 화폐가치로 평가하는 피해비용 접근법이 일반적으로 적용된다. 그러나 한국에서는 타당성 조사를 비롯한 소음비용 평가에 소음 피해를 줄이기 위한 방음벽 설치비용 소음비용을 추산하는 회피비용 접근법이 적용되고 있다. 회피비용 접근법은 관련 정보가 부족할 때 유용할 수 있으나 후생경제학적 정합성이 떨어진다는 지적이 있다.

이에 본 연구는 피해비용 접근법을 바탕으로 소음의 외부비용을 산정하는 방안을 제시하였다. 이를 위하여 네 가지를 검토하였다. 첫째, 한국의 실정에 맞는 소음피해 비용 원단위를 41,737~601,910 원/(인·년)으로 도출하였다. 둘째, 소음도 예측식을 이용해 소음 영향권을 설정하였다. 셋째, 소음피해 인구는 소음 영향권 내에서 소음에 노출된 인구와 실제 피해인구 비율의 곱으로 추산하였다. 마지막으로 소음의 피해비용을 산출하는 과정을 간소하게 하는 소음 피해비용과 소음도간 관계식을 제시하였다. 또한, 이를 바탕으로 피해비용 접근법과 회피비용 접근법으로 소음저감 편익을 산출하고 비교함으로써 피해비용 접근법이 회피비용 접근법보다 이론적 정합성과 정책적 신뢰성이 높은 방법론임을 확인하였다.

본 연구는 피해비용 접근법으로 교통 소음의 외부비용을 산정하는 방안을 제시하고 이를 토대로 다양한 시사점을 도출하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 본 연구의 결과는 국내 교통시설 타당성 조사를 비롯한 교통 소음의 외부비용 평가에서 학술적 보편성과 실효성을 갖춘 피해비용 평가 방안을 마련하는데 기여할 것으로 기대한다. 한국 실정에 맞는 소음 피해비용 원단위와 피해인구 비율에 관한 후속 연구가 연계되고, 소음 영향권과 피해인구에 대한 구체적인 데이터베이스가 구축될수록 피해비용 접근법의 신뢰성과 활용도는 점차 높아질 것이다.

알림: 이 논문은 한국철도학회 2016년 춘계학술대회(2016.5.20)에서 발표된 ‘피해비용 접근법을 이용한 철도교통 소음비용 산정 연구’를 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

- Ahn S., Rho P. (2007), Estimating Wetland Values Using Meta-regression Benefit Transfer Method in Korea, Korea Environment Institute, Sejong, Korea. (In Korean)
- Bateman I.J., Day B.H., Lake I. (2004), The Valuation of Transport-Related Noise in Birmingham, Technical Report to the Department for Transport, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom.
- Bickel P., Friedrich R., Burgess A., Fagiani P., Hunt A., De Jong G. et al. (2006), Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO), Deliverable D5: Proposal for Harmonised Guidelines, IER, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Bickel P., Schmid S., Tervonen J., Hämekoski K., Otterström T., Anton P. et al. (2003), Environmental Marginal Cost Case Studies, UNITE Deliverable 11, IER, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Birn K., Bolik H., Rieken P. (2005), Macroeconomic Evaluation Methodology: Federal Transport Infrastructure Plan 2003, Federal Ministry of Transport, Building and Housing, Berlin, Germany.
- Chang J., Kim D. (2013), Hedonic Estimates of Rail Noise in Seoul, Transport. Res. Part D: Transp. Environ., 19, 1-4.
- European Commission (2002), Position Paper on Dose Response Relationships Between Transportation Noise and Annoyance, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- HSEA W. (2003), Valuation of Noise: Position Paper, Working Group on Health and Socio-Economic Aspects, Brussels, Belgium.
- Kang D. (1997a), Railroad Noise and its Impact, Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 7(5), 827-836. (In Korean)
- Kang D. (1997b), Prediction of Railroad Noise, Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 7(6), 1001-1006. (In Korean)
- Korea Development Institute (KDI) (2008), A Study on Standard Guidelines for Pre-feasibility Study on Road and Railway projects (5th ed.), Korea Development Institute, Sejong, Korea. (In Korean)
- Korzhenevych A., Dehnen N., Bröcker J., Holtkamp M., Meier H., Gibson G. et al. (2014), Update of the Handbook on External Costs of Transport, European Commission DG Mobility and Transport, Brussels, Belgium.
- Maibach M., Schreyer C., Sutter D., van Essen H., Boon B., Smokers R. et al. (2008), Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT), CE Delft, Delft, Netherlands.
- Mankiw N. G. (2011), Principles of Economics, Cengage Learning.
- MOLIT (2012), Road Design Handbook (도로설계편람), Sejong, Korea. (In Korean)
- MOLIT (Korea Minister of Land, Infrastructure and Transport) (2013), National Guidance on Transport Appraisal (5th ed.) (교통시설 투자평가지침 제5판), Sejong, Korea. (In Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (1987), A Study on the Comprehensive Counterplan for the Reduction of Traffic Noise (1), National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Navrud S. (2002), The State-of-the-Art on Economic Valuation of Noise, Report prepared for the European Commission,

European Commission DG Environment, Brussels, Belgium.

Schreyer C., Schneider C., Maibach M., Rothengatter W., Doll C., Schmedding D. (2004), External Costs of Transport: Update Study, INFRAS, Swiss.

UK Department for Transport (DfT) (2014), TAG UNIT A3: Environmental Impact Appraisal, UK DfT, London, United Kingdom.

UK Highways Agency (HA) (2011), Design Manual for Roads and Bridges, Environmental Impact Assessment (DMRB), Volume 11, Section 3, Part 7, HA.

van Essen H., Schroten A., Otten M., Sutter D., Schreyer C., Zandonella R. et al. (2011), External Costs of Transport in Europe: Update Study for 2008, CE Delft, Delft, Netherlands.

Watkiss P., Anthoff D., Downing T., Hepburn C., Hope C., Hunt A. et al. (2005), The Social Cost of Carbon (SCC) Review - Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment, UK Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, United Kingdom.