개인생명가치추정을 통한 안전개선 비용효과 분석에 관한 연구
a Study on Cost-Benefit Analysis for Value of Preventing a Statistical Fatality

박찬우* 김상암* 왕종배* 홍성호* 곽상록*
Park, Chan-Woo Kim, Sang-Am Wang, Jong-Bae Hong, Seong-Ho Kwak, Sang-Log

ABSTRACT

Whenever some new measure to promote safety is being considered, one major input into the decision making process is to be some formal assessment of the costs and benefits involved. What levels of safety do many stakeholders believe the railway should deliver? This paper is a contribution to the efforts to answer the question. In this study, under Willing-To-Pay(WTP) based value of preventing a fatality(VPF) approach, we will study how much people are willing to trade off safety against other desirable things, summarize accepted quantitative criteria for safety quantitative criteria for safety decision, describe differences between these criteria and some current risk control actions, and present an outline of work under way to address issues related to cost-benefit analysis(CBA).

1. 서론

철도가 어느 정도까지 안전해야 하는가? 안전기준에 대한 의사결정을 할 때 어떤 기준이 사용되어야 하는가? 철도는 승객, 일반 국민, 정부, 산업 등 많은 이해 관계자를 대상으로 하는 시스템이며, 이들을 대상으로 철도가 반드시 달성해야 하는 안전수준은 무엇인가? 이와 같은 질문은 철도 이외의 산업에서도 일반적이며, 단지 안전에 대한 것 뿐 아니라 비용-효과 측면에서 다른 산업에서도 일반적인 질문이다.

안전개선을 위해 새로운 방안을 고려할 때, 의사결정과정의 고려사항은 판단된 안전개선투자에 대한 비용과 편익이며, 이를 분석하기 위해서는 안전개선의 비용과 편익을 통계적 가치로 환산할 수 있어야 한다. 유럽 및 북미지역에서는 통계적으로 예상할 수 있는 교통사고의 수를 경감하기 위해 사회가 부담해야 할 투자비용을 추정하는 방법론에 관해 광범위하게 연구하고 있으며, 한국철도에도 안전측면에서 투자비용에 대한 안전개선의 효과를 검증할 때 위험경감 및 안전확보 활동상의 비효율적 문제점을 개선하는 생명가치를 고려한 비용-편익 분석(CBA, cost benefit analysis)에 관한 모형이 한국철도에 적합한 체계로 개발되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 철도사고로 인한 인명사상에 대한 피해나 손실을 논리적/정략적으로 평가할 수 있는 "생명가치추정(VPF)에 의한 비용-편익 분석" 기법을 조사하고, 인간의 생명가치와 위험제어수단의 효용가치를 판단하는 안전개선의 비용-편익 분석을 수행 할 수 있는 모델개발의 연구를 소개하고자 한다.

---

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

본고의 2장에는 비용-편익 분석의 개념을 제시하는 ALARP 원칙과 위험도 평가 프로세스에 대해 살펴보고, 3장에서는 "생명가치추정(VPF)에 의한 비용-편익 분석" 기법을 소개하며, 제 4장에서는 구체적인 연구사례를 고찰한다. 마지막으로 제 5장에서는 비용-편익 분석의 고려사항 및 추후 연구방향을 제시하고자 한다.

2. ALARP(As Low as Reasonably Practicable) 원칙과 위험도 평가 프로세스

2.1. 영국의 ALARP 원칙

영국의 "Health and Safety at Work Act(1974)"는 합리적이고 실행 가능한 경우 건강, 안전 복지를 보장하기 위하여 고용자에게 의무를 부여하는 합리적 시행(reasonably practicable)의 개념을 도입했다[1,8]. 합리적 시행(reasonably practicable)의 개념에 따르면, 만약 위험원 감소를 위한 방안이 존재하고, 얻어지는 위험원 감소의 이익과 비교하여 비용이 타당하다면, 위험원을 보편적으로 허용할 수 있는 수준까지 반드시 감소시켜야 한다. 이것은 ALARP 원칙으로 정의되며, 이 원칙은 안전규제자가 아래와 같은 두 가지의 목적을 달성하기 위한 수단으로 사용된다.

- 조직이 경제성을 고려하면서 안전개선을 위한 관리활동을 수행할 수 있도록 하는 것
- 모든 조직에 대해서 안전에 대한 판단이 동일한 방법으로 적용되고, "Health and Safety at Work Act(1974)"따라 통제될 수 있도록 하는 것

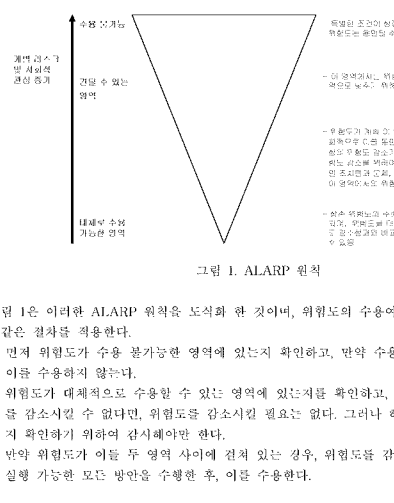

그림 1. ALARP 원칙

그림 1은 이러한 ALARP 원칙을 도식화 한 것이며, 위험도의 수용여부를 결정하기 위하여, 아래와 같은 절차를 적용한다.

① 먼저 위험도가 수용 불가능한 영역에 있는지 확인하고, 만약 수용 불가능한 영역에 있다면 이를 수용하지 않는다.

② 위험도가 대체적으로 수용할 수 있는 영역에 있는지를 확인하고, 합리적인 비용으로 위험도를 감소시킬 수 없다면, 위험도를 감소시킬 필요는 없다. 그러나 해당 영역에 계속 남아있는지 확인하기 위하여 감시해야만 한다.

③ 만약 위험도가 이들 두 영역 사이에 걸쳐 있는 경우, 위험도를 감소시키기 위한 합리적으로 실행 가능한 모든 방안을 수행한 후, 이를 수용한다.

위험도 감소와 마찬가지로 위험도 평가에도 조건이 있으며, "Management of Health and Safety at Work Regulation(1992)"는 "Health and Safety at Work etc Act(1974)"에 따라 제정되었으며 법적 효력을 갖으며, 고용자들이 업무상 위험에 노출된 모든 사람에게 위험도에 대하여 "적절하고 충분한" 평가를 하도록 요구하고 있다.

2.2. 위험도 평가 프로세스

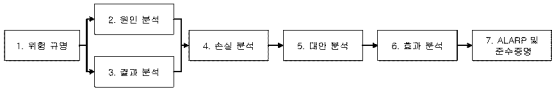

그림 2. 위험도 평가 프로세스

본고에서 고려하는 위험도 평가 프로세스는 그림 2와 같으며, 이 프로세스의 각 단계별 활동은 아래와 같이 요약될 수 있다[4,8].

- 위험규명: 위험 규명 및 분류 수행
- 원인분석: 위험을 야기할 만한 주요 원인을 규정하고, 각 위험의 발생 가능성 추정
- 결과분석: 위험으로부터 야기될 것으로 판단되는 중간 상황 및 최종 결과의 파악과 각 위험으로부터 야기된 사고발생 가능성 추정
- 손실분석: 위험도 감소를 위한 대책을 고려하기 전에 안전손실 규모의 측정
- 대안분석: 대책 결정 및 비용산출
- 효과분석: 위험도 감소에 따라 각 위험도 감소 대안실시와 관련한 순이익 산출
- ALARP 및 준수증명: 어떠한 위험도 감소대책을 실시해야 하는지에 대한 결정과 상존 위험도 수용의 정당화 수행

위험도 평가 프로세스에서 ALARP 원칙이 적용되기 위해서는 비용과 안전개선의 이익을 비교할 수 있는 방법을 필요로 한다. 공공분야의 의사결정에는 가능한 영향을 받을 수 있는 사람들의 선호를 반영해야 해야 하고, 이 선호의 측정은 개인이 바라는 개선에 대해 개인이 지불할 수 있는 개인적 성향(WTP, willingness to pay)에 의해 측정된다. 위험감소를 위해 위험에 영향을 받을 수 있는 집단 구성원들의 WTP의 합은 집단의 통계적 생명가치로써 측정될 수 있고, 이는 생명가치평가(VPF, value of preventing a fatality)로 정의된다. 즉, VPF는 사고에 의한 발생한 사망자 한 명을 감소시키기 위한 집단의 투자비용을 의미하며, 합리적 실행여부를 평가하기 위하여 비용-편익 분석에서 사용된다. 잠재적 위험관리활동의 비용과 이득이 평가되고, 사망자 한 사람을 감소시키기 위해 투자된 위험도관리활동의 비용이 VPF보다 작거나 같다면, 이 위험도관리활동은 합리적으로 실행 가능하다고 판단되며, 이것은 반드시 수행되어야 한다. 이러한 접근방법이 1988에 HSE(Health and Safety Executive)에서 처음으로 형식화되었다[2,3]. 비록 이 연구가 원자력 발전소의 안전의사결정을 대상으로 개발된 것일지라도, 이 원칙은 여러 분야에서 적용되고 있다.

3. WTP 기반의 VPF 측정

합리적 실행가능성을 결정하기 위하여 영국철도산업에서 VPF는 연간철도안전계획서(annual Railway Group Safety Plan)에서 철도산업을 대표하여 RSSB(Rail Safety and Standard Board)에

의해서 정의되고, 매년 갱신되며, 이것은 다음과 같은 값을 가진다[1].

- £1.30m: 도로안전에서 정부가 주로 사용되는 값과 일치
- £3.64m: 철도안전측면에서 다수의 사망자를 포함할 수 있는 사고를 예방하고 감소시키는 목적으로 더 높은 값을 가지는 VPF를 사용

두 가지 VPF 값의 사용은 사회적 관심을 반영하기 위한 시도이며, 이것은 사고의 다량 발생으로 많은 사망자 수를 발생시키는 작은 사고와 비교하여 한번에 다수의 사망자를 발생시킬 수 있는 대형사고에 대해서 사회가 더 많은 관심을 가지는 경향을 나타낸다. 사회적 관심을 반영하여 영국의 경우 도로와 철도에 다른 VPF를 사용하고 있으나, 스웨덴, 미국, 노르웨이 등에서는 철도와 도로분야에서 같은 VPF를 사용하고 있다[6].

설질적으로 WTP 접근방법은 다음과 같은 예제로 설명될 수 있다. 열차사고로 사망자의 50명을 막을 수 있을 것으로 기대되는 새로운 기술이 £100m의 비용으로 수행될 수 있다고 가정하고, 열차사고는 다수의 사망자를 발생시킬 수 있고, 더 높은 VPF가 적용될 수 있으므로, £3.64m VPF가 사용된다고 가정하자. 그러면, 이 새로운 기술에서 사망자 한사람을 예방하는데 비용은 £2m이므로, £3.64m의 VPF보다 작은 값을 가지므로, 이 기술은 합리적이라고 판단되어 수행이 가능하다고 판단할 수 있다. 만면에, 만약 이 새로운 기술이 5명의 사망자를 막을 수 있을 것으로 예상된다면, 사망자 한사람을 예방하는데 비용은 £20m이 된다. 이 것은 £3.64m의 VPF보다 큰 값을 가지므로 이 새로운 기술을 적용하는 것이 합리적으로 설행 가능하다고 판단할 수 없다.

WTP 접근 하에, 위험도 감소의 가치는 다음과 같이 설명된다. 100,000 사람이 사망사발생확률을 1/100,000로 감소시키는 안전개선투자에 의해 혜택을 받는다고 가정하면, 이 그룹에서 사망자 기대 수는 한 명이다. 만약 이 안전개선투자에 대한 WTP가 £3.64라면, VPF는 아래와 같이 계산된다[6].

$$\frac{3.64}{1/100000} = £364,000 = £3.64\,\mathrm{m}$$

위의 예에서, 사망자발생확률을 1/100,000로 감소시키는 안전개선투자에 대한 개인의 평균 WTP (£3.64)는 그룹 구성원의 위험도에 대해서 안전개선의 한계 투자비용이며, 많은 연구들이 원자력, 철도, 항공 등의 분야별 안전개선의 한계 투자비용을 평가하고 있다. WTP를 평가하는 방법에는 크게 다음과 같은 3가지 방법이 사용되고 있다; 대부적 평가(revealed preference, implied value), 외부적 평가(contingent valuation, expressed value), 비례적 평가(relative valuation, relatives).

대부적 평가 방법은 사람들이 실질적으로 위험도에 대하여 소득 및 자산을 교환하는 객관적인 자료를 기반으로 한다. 예를 들어, 위험도가 높은 직업은 상대적으로 높은 급여가 측정될 수 있으므로, 이러한 자료를 기반으로 해당 분야에 대한 개인의 선호도를 측정할 수 있을 수 있을 것이다. 그러나 앞의 예제에서 대부적 평가 방법은 개인이 직업 선택 시 해당 직업의 위험에 대해 잘 알고 있다고 가정하고 있으며, 직업선택에서는 급여에 영향을 줄 수 있는 많은 다른 요소가 존재할 수 있으므로, 실질적으로 적용에 어려움이 있다.

대부적 평가 방법과 대조적으로 외부적 평가 방법은 집단 구성원의 샘플링을 통한 설문조사나 인터뷰를 이용하여 직접적으로 안전개선에 대한 WTP를 측정하며, 경우에 따라서는 사고에 대한 개인보상가치(WTA, willing to accept)에 의해 WTP를 측정하기도 한다. 외부적 평가 방법의 장점은 WTP를 측정하는 연구자에게 다양한 설문조사 방법을 통하여 직접적으로 다양한 정보를 얻을 수 있게 하는 장점이 있으나, 매우 작은 위험도를 가지 임의의 사고를 가정한 질문에 대해서는 조사 대상자들이 정확한 답변을 줄 수 없다는 단점을 가지고 있다.

이러한 어려움을 개선하고자 비례적 평가방법은 직접적으로 조사대상의 분야에 대한 WTP를

측정하기보다는 일반 대중에게 친숙한 사고에 대하여 조사대상의 분야의 위험도의 비율을 측정한다. 만약 비율이 구해지면, 이 비율에 일반 대중에게 친숙한 분야의 WTP을 곱하여 조사대상의 분야의 WTP를 측정하는 방법이다.

4. WTP 기반의 VPF 측정 연구 사례

1998년과 2000년에 Jone-Lee[6,7]는 영국 정부의 지시로 기존 VPF 값의 적합성을 검증하기 위하여 도로, 철도, 화재 분야의 위험에 대한 VPF의 추정에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 다양한 인터뷰 방법과 설문조사 방법을 통하여, VPF의 측정을 시도하였다. 이 연구의 초창기에는 내부적 평가 방법을 도입하여 VPF을 측정하였으나, 앞에서 제기되었던 내부적 평가 방법의 문제점으로 비례적 평가방법의 개념을 도입하였고, 최종적으로 다음과 같은 접근방법을 사용하였다.

- 단계 1: 내부적 평가방법을 이용하여 조사대상자에게 친숙한 자동차 경상사고에 대한 WTP와 WTA의 조사
- 단계 2: 측정된 WTP와 WTA를 입력 값으로 가정된 효용함수를 이용하여 자동차 경상사고에 대한 WTP 측정
- 단계 3: 자동차 경상사고와 비교하여 자동차 사망사고의 안전개선의 중요도 비율 측정
- 단계 4: 단계 2와 3에서 측정된 값의 곱으로 자동차 사망사고에 대한 WTP 및 VPF 측정
- 단계 5: 자동차 사망사고와 비교하여 철도, 화재 분야 등 연구분야의 안전개선의 중요도 비율 측정
- 단계 6: 단계 4와 5에서 측정된 값의 곱으로 해당 연구분야에 대한 WTP 및 VPF 측정

이와 같은 연구방법에 의해 측정된 연구결과는 표1과 2와 같다.

표 1. 자동차 사고에 대한 VPF

효용함수	VPF	표준오차
Neg. Exponential	£920,000	£150,000
Homogeneous	£1030,000	£170,000
Logarithmic	£1260,000	£210,000
$n^{1/3}$ Root	£1550,000	£270,000

표 2. 도로사고에 대한 분야별 안전개선 중요도 비율

분야	비율
가정내의 화재	0.926
철도사고	0.834
공공장소의 화재	0.923

5. 결론

본 논문에서는 사고로 인한 인명사상에 대한 피해나 손실을 논리적/정략적으로 평가할 수 있는 VPF에 의한 비용-편익 분석의 필요성을 제기하였고, 비용-효과분석의 개념을 제시하는 ALARP 원칙과 위험평가프로세스에 대해 살펴보았으며, 구체적인 VPF 기법을 소개하였다.

안전개선을 위한 새로운 방안을 고려할 때, 의사결정과정의 중요한 측면은 관련된 비용과 편익의

평가이며, 이를 위해서는 안전개선의 비용과 이익을 통계적 가치로 환산할 수 있어야 한다. 향후 한국철도에도 안전개선의 효과를 검증할 때 위험경감 및 안전확보 활동성의 비효율적 문제점을 개선하는 생명가치를 고려한 비용-효과 분석에 관한 모형이 한국철도에 적합한 체계로 개발되어야 할 것이다. 만약 이와 같은 체계가 개발될 된다면 기대되는 효과는 다음과 같다.

- 부적당한 비용의 회피
- 철도 고객과 의사결정자를 포함하는 철도관계자들과의 더 나은 의사소통
- 철도가 반드시 달성해야 하는 안전목표의 구체화
- 철도산업과 정부관련 부서에 대한 개선된 여론

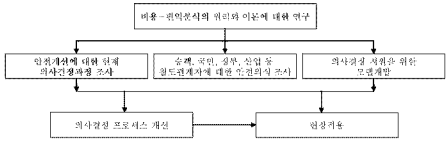

그림 4. 비용-편익분석의 향후 연구 분야

향후 선행되어야 연구는 그림4와 같이 요약될 수 있으며, 각 분야의 연구들은 아래의 것을 복합적으로 고려해야 할 것이다.

- 어떤 기준과 프로세스가 반드시 안전결정을 위해서 존재해야 하는가에 대한 연구의 구조화
- 철도관계자들을 연구에 포함시키려는 적절하고 신중한 방안
- 설정된 기준과 프로세스의 수행과 유지를 위한 관리방안

참고문헌

1. Andrew Sharpe(2004), "Safety Decision Making for the Railway", Proceedings of Twelfth Safety-critical System Symposium
2. HSE(1998, 1992), "The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations", HSE Books
3. HSE(1989), "Quantified Risk Assessment: its input to decisions making", HSE Books
4. HSE(2001), "Reducing risks, protecting people: HSE's decision-making process", HSE Books.
5. Lena Winslott Hiselius, "The value of road and railway safety"
6. Michael Joenes-Lee et el.(2000), "Value of Benefits of Health and Safety Control", HSE
7. Michael Joenes-Lee et el.(2000), "Value of Benefits of Health and Safety Control: Follow-Up Study", HSE
8. Railtrack(2000), "Engineering Safety Management Issue 3 Yellow Book 3 Volume 1: Fundamentals", Railtrack PLC