

기후변화에 따른 교통불편익산정에 관한 연구

Calculation of the Disbenefit on Roads by Climate Changes

손지언* · 이승재** · 김주영*** · 김창균****
Sohn, Jhi Eon · Lee, Seung Jae · Kim, Joo Young · Kim, Chang Kyun

Abstract

The relationship between climate changes and transportation could be separated by two approaches. One of methods was to find how climate changes affected transportation, and the other way was how transportation affected climate changes. In this study, we reported from the former standpoint, how climate changes affected transportation fields. When there is a lot of snowfall in Seoul, it starts ripple effect through the travel patterns. They can be explained by travel time and operating cost. The travel costs were calculated in this paper for analysing the effect of disbenefit by climate changes. Snow Melting System was also studied for relieving negative influences under the unpredictable weather condition. As a result, the system was effective for minimizing disbenefit by climate changes.

Key words : economic disbenefit of climate changes, snow melting system, estimation of travel time

요 지

기후변화와 교통의 관계는 크게 기후변화가 교통에 미치는 영향과 교통이 기후변화에 미치는 영향으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전자의 관점에서 폭설이 도시교통에 미치는 영향을 파악하였으며, 통행자의 불편익에 대한 방안을 제시함으로 폭설에 대해 효과적으로 대처하고자 하였다. 예기치 못한 기후변화의 파급효과는 통행시간과 운행비용, 사고비용 등으로 분석되었으며, 이를 기반으로 해당구간의 용설시스템(Snow Melting System) 도입에 따른 사업의 효과성을 분석하였다. 본 연구의 결과는 기후변화로 인한 교통불편익을 최소화하는 방재시설물 설치를 위한 평가기준으로 적용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 기후변화에 따른 교통불편익, 용설시스템 경제성평가, 통행시간절감편익, 운행비용절감편익

1. 서 론

1. 연구의 목적 및 배경

최근 도심지에서는 계절적으로 발생하는 국지성 폭우와 폭설 등으로 인해 경제적인 피해가 심각해지고 있다. 기상이변으로 인한 집중호우, 홍수, 가뭄 등의 자연재해가 도시에 크게 영향을 미치게 되면서 이에 대한 대책마련이 시급해지고 있다. 기상이변이 단순히 기후변화이상의 의미를 가지는 이유는 경제적인 측면에서 불편익을 유발시키기 때문이다.

이와 관련하여 교통부문에서는 탄소배출을 저감하기 위한 제도를 도입해 왔다. 자동차 매연이 기후의 이상현상을 유발시키고, 장기적으로는 집중호우 및 폭설과 같은 자연재해를 야기하기 때문이다. 자연재해는 다시 교통사고 등을 유발시킴으로 경제적인 효율성을 저감시키게 되는 원인이 된다. 즉, 교통을 이용하는 통행자에게 불편익을 발생시켜 경제적인 측면에서 효율을 감소시킨다. 때문에 기후변화와 기상이변 등의 원인을 감소키는 노력과 더불어 도로이용자들의 불편익을 감소시킬 수 있는 방법을 고려해야한다. 폭설의 원인을 원천적으로 제거하지 못하는 한, 필연적으로 교통문제가 발생하게 될 것이기 때문에 용설시스템 도입과 같은 적극적인 대안을 마련하는 것이 필수적이다.

면에서 효율을 감소시킨다. 때문에 기후변화와 기상이변 등의 원인을 감소키는 노력과 더불어 도로이용자들의 불편익을 감소시킬 수 있는 방법을 고려해야한다. 폭설의 원인을 원천적으로 제거하지 못하는 한, 필연적으로 교통문제가 발생하게 될 것이기 때문에 용설시스템 도입과 같은 적극적인 대안을 마련하는 것이 필수적이다.

1.2 문제점 제기

교통계획은 장기적인 관점과 단기적인 관점으로 분류할 수 있으며, 기후의 변화는 장기적으로 매우 큰 파급효과를 가지게 된다. 그러나 교통계획에서 구분하는 시간적인 범위는 기후변화에 따른 기준과 구조적인 차이점이 있음을 밝힌다.

지난 10여년간 서울에 대한 최심신적설(Maximum Depth of Snowfall)을 조사한 결과는 그림 1과 같다. 자료를 통해 도심(서울)에서는 간헐적인 폭설이 비정기적으로 관측되었음

*서울시립대학교 교통공학과 박사과정(E-mail : dreamynd@gmail.com)
**서울시립대학교 교통공학과 교수(교신저자)
***서울시립대학교 교통공학과 박사과정
****서울시 교통정보센터장

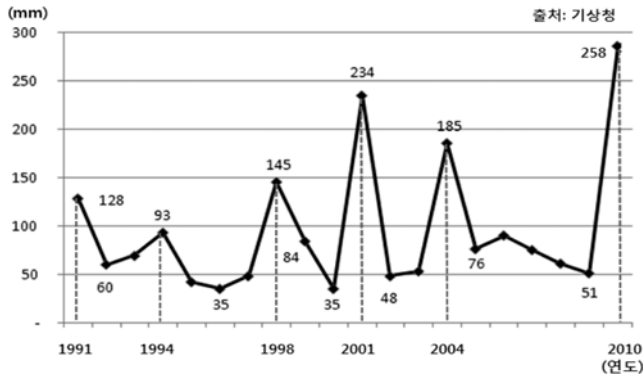


그림 1. 최심신적설량(서울)

표 1. 2001년, 2002년 결빙 및 폭설로 인한 사고현황

사고 년도	신적설합계 (서울)	결빙			폭설		
		사고	사망	부상	사고	사망	부상
2001 년도	826 mm	2,987건	125명	5,706명	165건	31명	1,864명
2002 년도	131mm	141건	21명	228명	28건	3명	58명

출처: 도로교통안전관리공단(2003) 및 기상청 홈페이지

을 확인할 수 있다. 2~3년을 주기로 약 100 mm 이상의 강설이 있었으며, 2004년 이후에는 감소추세를 보이다가 2010년 1월 4일 현재, 258 mm의 폭설이 관측되었다.

예상치 못한 폭설은 그 정도에 따라서 인적·물적인 피해를 발생시킨다. 표 1은 결빙과 폭설시 발생한 서울지역의 사고현황이다. 2001년은 최심신적설량이 234 mm로 높았다. 신적설합계량도 826 mm로 매우 높았다.¹⁾ 이 시기에 폭설로 인한 사망은 차년도(2002년)의 사망건수에 비해 약 10배가 높고, 사고건수는 6배, 부상지수는 약 32배가 더 많은 것으로 조사되었다. 따라서 2010년 폭설로 인한 교통사고에 대한 경제적 손실 또한 매우 높을 것으로 예상할 수 있다.

폭설로 인한 사회적인 손실은 사고와 사망 이외에도, 교통 두절현상과 지체 및 정체로 인한 시간비용, 그리고 화물수송 지연에 대한 경제적인 손실 등이 있으며, 쾌적성과 같이 정량화하기 어려운 항목도 존재한다. 이와 같이 예상치 못한 기상이변으로 인한 불편익은 통행량이 많은 도심지역에서 크게 발생한다. 따라서 본 연구에서는 강설에 대한 대안으로 도심구간의 용설시스템을 고려하였다.

기존방식의 제설작업은 강설 시점, 혹은 양에 따라서 실시된다. 눈이 오기 전에는 젖은 염화물과 고체소금을 섞은 수용액을 도로에 뿌리는 예비살포 작업을 시행한다. 이러한 염수살포방식은 모래를 살포한 제설작업에 비해 매우 효과적이다. 그러나 대량의 눈에는 효과적이지 못하고, 도로포장재와 자동차의 부식을 촉진시킨다는 단점이 있다. 때문에 최근에는

서해대교 등 일부 구간에는 저공해 제설제를 이용해 제설작업을 한다. 강설량에 따라서는 제설차량을 통한 리무빙, 블로잉, 압설제거 작업을 동시에 진행하기도 한다. 그러나 이 역시 200 mm 이상의 폭설이 내리는 경우에는 효과적이지 못하다는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 위와 같은 제설방법이 통용되는 소량 강설보다 예기치 못한 폭설시에 교통혼잡을 완화시키는데 목표를 둔다. 기습적인 기상악화에 대한 과급효과가 큰 서울은 그림 1에서와 같이 지난 10여 년간 최대 200 mm 이상의 폭설이 간헐적으로 관측되었다. 따라서 사회·경제적인 불편익이 많이 발생하는 주요 도로, 주요 구간에 대해 즉각적인 대응이 가능한 용설시스템(Snow Melting System) 설치에 대한 타당성을 고려할 필요성이 있다.

2. 연구의 방법론

기후변화가 교통에 미치는 과급효과를 분석하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 동일지역에서 기후조건이 다를 경우에 교통패턴의 변화를 분석한다. 이를 통해서 산출된 도로, 철도 등의 수단분담변화율은 기후변화의 과급효과를 알아낼 수 있는 척도가 될 것이다. 그러나 도출된 값을 타지역에도 적용할 수 있을 것인가에 대한 문제점이 존재한다.

둘째, 교통행태의 변화를 분석하되, 계절적인 변동에 따라서 연구하는 방법이다. 계절적인 변화는 날씨의 변화로 설명이 가능하며, 이것이 통행행태 변수로 작용을 하게 되는 것이다. 이때는 화물통행과 여객통행으로 세분화할 수 있다. 여객통행은 월별로 분석이 가능하기 때문에 기후와 관련 없는 통행의 패턴을 파악할 수 있다. 즉, 크리스마스와 같은 휴일 및 여름 휴가기간 등에 대해서도 통행의 특성들을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

세 번째 방법으로는 날씨와 통행행태의 즉각적인 반응을 고려하는 것이다. 이것은 기후에 대한 교통의 단기간 적응(Adjustments) 패턴으로 설명이 가능하다.

본 연구는 첫 번째 방법과 세 번째 방법을 적용하여 날씨와 통행행태의 관계를 고려하였다. 또한 용설시스템 도입과 관련하여 기후변화에 따른 교통부문의 과급효과를 산정하기 위해 다양한 편익의 유형을 고찰하였다.

사업의 과급효과를 진단할 수 있는 영향권은 서울을 중심으로 주요 존에 대한 직접영향권과 간접영향권을 선정하였다. 영향권 선정시에는 RV법²⁾과 PV법³⁾, 그리고 Select Link Analysis를 이용하였다.

마지막으로는 강설에 따른 시나리오를 설정하고, 이에 따른 교통분석과 용설시스템을 도입했을 경우에 비용편익분석을 실시하여 사업의 효과성측면을 분석하였다.

¹⁾ 연구의 정확한 문제제기를 위하여 최근 자료인 2010년 현황을 이용하여야 하나, 통계의 발표시점으로 인해 최근 적설량과 유사한 2001년의 자료를 참조하였음.

²⁾ 사업시행으로 인한 교통량 변화율(RV법)

³⁾ O/D기준 통행량 비율(PV법)

3. 사례분석

3.1 경제성 평가

3.1.1 통행시간 절감편익

본 연구에서 고려된 통행시간 절감편익은 한국개발연구원(KDI)의 지침을 따르고 있다. 한국개발연구원(2009)의 지침은 미국 공로국(Bureau of Public Road; BPR)에서 개발한 도로혼잡함수를 기반으로 하고 있으며, 도로상황에 따른 수정된 함수식을 적용하고 있다.

통행시간 절감편익은 통행배정 결과로 산출된 링크의 통행시간과 차종별 교통량을 곱하여 도로부문 총 통행시간을 산출한다. 차종별 사업미시행시와 사업시행시에 대해 수단별로 산출된 총통행시간은 각기 다른 시간가치를 적용하여 총 통행시간 비용을 산출한 후, 비교된 차액을 통행시간 절감편익으로 산출한다. 통행시간 절감편익 산출방법은 식(1)과 같다.

$$VOIS = VOT_{\text{사업미시행}} - VOT \quad (1)$$

$$\text{여기서 } VOT = \left\{ \sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^3 (T_{kl} \times P_k \times Q_{kl}) \right\} \times 365$$

T_{kl} : 링크 l의 차종별 통행시간

P_k : 차종별 시간가치

Q_{kl} : 링크 l의 차종별 통행량

k : 차종(1: 승용차, 2: 버스, 3: 화물차)

3.1.2 운행비용 절감편익

교통시설사업 시행시 통행거리가 단축되고 통행속도가 증가함에 따라 차량운행비용이 감소되는 효과가 발생한다. 경제성 분석을 위한 차량운행비용 산정에는 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비, 감가상각비만을 고려한다. 운행비용 절감편익은 사업시행시와 미시행시 각각 통행배정 결과로 산출된 링크의 통행속도와 속도·차종별 차량운행비용의 원단위를 적용한다. 이를 통해 총 운행비용을 산출하여 그 차이를 계산하게 된다. 운행비용 절감 편익 산출식은 식(2)와 같다.

$$VOCS = VOC_{\text{사업미시행}} - VOC_{\text{사업시행}} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } VOT = \sum_{l=1}^3 \sum_{k=1}^3 (D_{lk} \times VT_k \times 365)$$

D_{lk} : 링크별(l), 차종별(k) 대·km

VT_k : 차종별(k) 해당 링크 주행속도의 km당 차량운행비용

k : 차종 (1= 승용차, 2= 버스, 3= 화물차)

3.2 사례연구 범위 설정

3.2.1 사례지역 선정

2010년 2월2일 서울시는 「서울형 중·단기 제설 개선대

책」을 통해 예기치 않은 폭설에 대응하기 위하여 비상발령 예고제 시행, 제설장비 현대화, 제설대책 진화 등을 발표하였다. 서울형 제설 개선대책 내용 중 취약구간에 대한 제설대책 강화를 위해 선정된 교통혼잡 도심 6개소는 다음과 같다. 한남로~삼일로, 반포로~세종로, 대학로~율곡로, 을지로~서소문로, 왕십리로~퇴계로, 성산로~사직로 구간이다.

본 연구에서는 이를 기반으로 하여 서울 도심 6개소 중 종사자수 분석결과, 출퇴근 유동인구가 가장 많은 지역인 강남·서초 지역과 중구·용산구를 잇는 구간 중 반포로 구간을 분석지역으로 선정하였다.

3.2.2 영향권 설정

영향권이란 교통두절로 인하여 현저하게 교통패턴의 변화가 발생하게 되어 이로 인한 파급효과가 미치는 공간적인 범위를 말한다. 영향권 설정 방법으로 크게 두 가지를 고려할 수 있다. 하나는 해당 사업지역내 시·군·구의 발생통행량 또는 도착통행량을 고려하는 것이다. 즉, 해당 사업지역의 발생통행량 대비 도착통행량의 비율(PV율) 또는 도착통행량 대비 발생통행량의 비율이 특정 수치 이상인 지역을 사업시행 영향권으로 설정할 수 있다. 다른 하나는 사업시행으로 인한 교통량 변화비율(RV율)을 고려하는 것이다. 이는 사업 시행 전과 후의 교통량 변화가 특정 수치 이상인 도로를 포함하는 지역을 영향권으로 설정할 수 있다. 이들을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$PV_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{j=1}^n V_{ij}} \times 100 \quad (3)$$

$$RV^k = \frac{V_{\text{시행}}^k - V_{\text{미시행}}^k}{V_{\text{미시행}}^k} \times 100 \quad (4)$$

여기서, PV_{ij} : 존 i의 발생통행량 대비 존 j의 도착통행량이 차지하는 비중(%)

RV^k : 사업시행시 Link k의 교통량 변화율(%)

V_{ij} : 존 i와 존 j간 통행량

$V_{\text{시행}}^k$: 사업시행시 Link k의 교통량

$V_{\text{미시행}}^k$: 사업미시행시 Link k의 교통량

이렇게 정의된 방법을 이용하여 분석권의 지역에서 발생하는 통행량들의 도착지 분포를 살펴보면, 다음 표 2에서와 같이 12개 지역의 도착통행량이 2% 이상인 것으로 나타났다.

강남권~도심권의 주요도로인 반포로를 폭설시 두절된 도로로 가정하고 폭설시와 정상상태일 경우, 교통량 변화비율(RV율)을 고려한 결과는 다음 그림 3과 같다. 통행분포의 카테고리 고리를 총 5개인 0.5% 미만, 0.5~1%, 1~2%, 2~5%, 5% 이상으로 구분하여 영향권의 통행분포 비율을 그림으로 나타냈다.

표 2. 대상 지역의 발생 통행량 분포

도착지	강남구	중구	서초구	용산구	성동구	동작구
통행량(trip)	80,214	36,433	30,484	19,734	14,479	12,618
비율(%)	23.4	10.6	8.9	5.8	4.2	3.7
도착지	송파구	마포구	광진구	성남시	종로구	영등포구
통행량(trip)	8,523	8,008	7,814	7,507	10,887	10,517
비율(%)	2.5	2.3	2.3	2.2	3.2	3.0



그림 3. 반포로 폭설시 교통량 변화비율(RV)

3.2.3 Select Link Analysis

그러나 RV법 및 PV법 만으로 영향권을 설정할 경우, 기준이 되는 명확한 수치를 사전적으로 제시하기는 어렵다. 교통분석 대상에 따라 적정 수치가 상이할 수 있기 때문이다. 예를 들어 PV율의 경우, i 지역 발생통행량 가운데 j 지역

도착교통량이 차지하는 비율은 j 지역의 범위를 어떻게 설정하느냐에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영향권 설정시 Select Link Analysis를 이용, 반포로 이용객의 기종점 분포를 파악하여 추가적인 영향권 설정에 이용하기로 한다.

반포로의 Select Link Analysis 결과, 강남구, 서초구, 용산구, 중구 및 종로구 관련 통행이 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 분석되었으며, 서울시 내부 통행은 63.9%인 것으로 나타났다.

3.3 분석대안 설정

3.3.1 폭설시 분석의 전제

반포로 구간에 대해 목적통행량 중, 출퇴근 및 업무 통행을 제외한 위락통행의 경우 통행 포기자로 간주하고 통행 총량을 조정하였으며, 1월 4일 폭설시의 실제 교통량 및 속도 자료를 활용하여 각 주요 구간의 교통량 및 통행속도 Calibration을 수행하였다. 통행배정시 Calibration을 위하여 교통량-지체함수(VDF: Volume-Delay Function)의 파라미터를 조정하여 폭설시의 현실적 특성이 나타나도록 조정하였다.

표 3. 반포로 이용자들 분포

(단위: 통행/일)

구분	강남구	서초구	용산구	도심	동남	동북	서남	서북	성남	고양	기타	계
강남구	2.42%	1.28%	4.24%	1.26%	0.40%	0.33%	3.57%	2.64%	0.47%	1.84%	1.51%	19.95%
서초구	1.67%	0.42%	3.43%	1.96%	0.55%	5.74%	1.49%	3.70%	0.17%	1.14%	0.69%	20.95%
용산구	4.12%	2.87%	0.13%	0.00%	0.95%	0.63%	-	0.01%	0.64%	-	0.11%	9.46%
도심	2.20%	1.69%	-	-	0.09%	-	-	-	0.81%	-	2.29%	7.08%
동남	0.27%	0.62%	0.59%	0.04%	-	0.01%	0.11%	0.26%	-	0.10%	-	1.99%
동북	0.35%	4.38%	0.50%	-	0.03%	0.01%	0.02%	-	2.07%	-	1.01%	8.37%
서남	1.78%	0.86%	-	-	0.06%	0.03%	-	-	1.69%	-	3.00%	7.42%
서북	2.25%	3.53%	0.01%	-	0.42%	-	-	-	0.50%	-	0.67%	7.39%
성남	1.01%	0.42%	0.78%	0.90%	-	0.71%	0.86%	0.28%	-	0.07%	0.14%	5.16%
고양	2.34%	1.59%	-	-	0.36%	-	-	-	0.17%	-	0.06%	4.53%
기타	2.31%	1.43%	0.07%	0.64%	0.00%	2.08%	0.45%	0.11%	0.41%	0.01%	0.18%	7.69%
계	20.72%	19.09%	9.75%	4.80%	2.85%	9.55%	6.49%	6.99%	6.94%	3.16%	9.66%	100%

- 주: 1) 도심: 종로구, 중구
- 2) 동남: 송파구, 강동구
- 3) 동북: 성동구, 광진구, 동대문구, 중랑구, 성북구, 강북구, 도봉구, 노원구
- 4) 서남: 양천구, 강서구, 구로구, 금천구, 영등포구, 동작구, 관악구
- 5) 서북: 은평구, 서대문구, 마포구
- 6) 기타: 경기도 기타지역

VDF함수는 다음과 같다.

$$T = [60 \times (L/S_m) + D] \cdot [1 + \alpha(V/C)^\beta] \quad (5)$$

여기서, T : 링크 통행시간(일반화 비용, 분)

L : 링크 거리(km)

S_m : 자유 속도(km/h)

D : 교차로 지체시간(0.33분)

V : 링크 교통량(pcu/시)

C : 링크 용량(pcu)

α, β : 파라미터

3.3.2 Snow Melting System

Snow Melting System은 결빙방지나 눈녹임 기능을 가지고 있으며, 포장체의 표면온도와 풍속조건을 고려하여 0.5°C(32°F)이상을 유지하기 때문에 포장면 위의 수분이나 잔설이 얼지 않도록 한다. 이는 겨울철 차량이나 보행자의 안전에 절대적인 영향을 초래하는 강우·강설 후, 기온하강에 의해 2차적으로 발생하는 결빙 현상을 최소화하고자 하는 설비라 할 수 있다. 또한 외기온도, 풍속, 습도, 눈의 밀도, 적설량 등에 따라 눈을 녹이기 위한 에너지양이 각각 다르기 때문에 Snow Melting System은 강설의 녹는 온도, 눈을 녹이기 위한 열의 공급상태, 표면 증발열의 손실과 포장면의 열손실 등을 적절히 고려할 수 있는 특징이 있다.

시스템 구조는 Heating cable, Control system으로 나뉘며, 본 연구에서는 병렬회로로 구성된 Self Regulating Heating Cable의 설치를 연구의 대상으로 하였다. 이것은 발열온도에 따라 발열체가 자율적으로 온도조절을 하므로 과열현상이 없기 때문에 안전하며, 전기에너지를 절감할 수 있어 유지비가 상대적으로 저렴한 것이 특징이다.

따라서 Snow Melting System의 도입을 통해 폭설에 따른 결빙방지 및 용설 효과를 극대화하여, 차량 및 보행자의 안전사고 방지와 원활한 교통 흐름을 기대할 수 있다. 설치가능 지역으로는 도로구배구간, 터널 입출구나 램프 경사 진입로 구간 등 눈녹임 필요장소 등이 해당하며, 현재 노원구청 진입램프, 서초구 서래마을 언덕, 강원도 횡성 문체터널 등에 시공되어 있다.

본 시스템 설치시 결빙방지를 위한 단위 면적당 필요한 소비전력은 약 300 W/m² 이상이다. 이를 기준으로 유지관리비용은 언덕구간 길이 50 m, 도로폭 7 m, 양방향(교행) 접지면

포설의 경우, 겨울철에 월강설일 별 하루 평균 10시간 열선 가동조건으로 도로 열선을 가동 시켰을 때, 서울의 연평균 강설일인 15.4일을 고려하면 기본요금에 약30만원의 요금을 산정할 수 있다.

3.4 분석 결과

3.4.1 교통 분석결과

1월 4일의 교통량 및 속도자료를 활용하여 교통량 및 속도 정산을 수행한 후, Snow Melting System을 설치하여 폭설시 용설시스템을 가동한 경우와 설치하지 않았을 경우의 통행속도를 비교한 결과는 다음과 같다.

그림 4에서 보는 바와 같이 두껍게 표현된 링크는 용설시스템 설치로 인하여 지체도가 감소하여 통행속도가 증가된 부분을 나타낸다. 그 결과, 반포로의 전반적인 통행속도가 향상되었고, 반포로와 과천을 잇는 선바위길, 선암IC 뿐만 아니라 반포대교, 반포대교~용산구간의 지체도 개선에 영향을 주는 것으로 분석되었다.

3.4.2 편익산정 및 경제성 분석

차량운행비용 원단위는 소비자 물가지수를 이용하여 2009년 기준가격으로 환산하였다. 차량운행비용 절감 편익 산정시 지침에 제시된 총 차량운행비용은 고속도로(도시고속국도)의 운행비용이다. 따라서 고속도로의 연료소비 향상률을 고려하여 일반도로(국도, 지방도 등)의 차량운행비용은 승용차 125%, 버스 115%, 트럭 120% 만큼 할증하여 적용하였다.

예비타당성 조사 지침에서 제시한 원단위는 차량속도



그림 4. 반포로 폭설시 지체도 변화

표 4. 유지비용 산정 예

포설면적 m ²	열선 m	발열량 w/m	총소요전력 kw	일사용시간 h	월강설일 day	전력량 kwh	요금
							원/월
50 m×7 m	400	80	32	10	5	1,600	160,000원
					10	3,200	192,000원
					15	4,800	288,000원
					20	6,400	384,000원

10 km/h를 기준으로 구분되어 있기 때문에 오차가 발생할 여지가 있으므로, 분석의 정확도를 높이기 위해 차량운행비용 원단위에 대한 회귀분석식을 사용하여 산정하였다. 각 차종별 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$\text{차량운행비용} = ax^3+bx^2+cx+d \quad (x=\text{링크통행속도}) \quad (6)$$

통행시간 절감편익의 산출은 일반적으로 링크 또는 O/D기반으로 수행된다. O/D기반은 평형통행배정을 통해 산출된 존간 통행시간을 이용하게 되나, 도로부분에 사용되는 링크 통행합수 내에 비용 부분이 포함되어 있어 적절하지 못하다. 따라서 통행배분 작업의 결과로 산출된 링크의 통행시간과 차종별 교통량의 곱을 이용하여 도로부분의 시간 절감편익을 산정하였다.

통행시간가치는 통행목적(업무통행과 비업무통행)에 따라 크게 달라진다. 업무통행의 경우 통행시간이 절감된 만큼 생산활동이 증가될 수 있으며, 통행자의 인건비는 최소 생산활동 가치를 나타낸다고 할 수 있기 때문에 업무통행의 시간가치를 인건비라고 가정한다.

승용차 이용 통행자의 2008년 기준 업무목적 통행시간가치는 19,494원/인·시간, 비업무목적 통행시간가치는 6,375원/인·시간이며, 버스운전자의 업무목적 통행시간가치는 10,705원, 버스이용자의 비업무목적 통행시간 가치는 3,117원/인·시간이고, 트럭운전자의 통행시간가치는 17,343원으로 제시되었다. 본 연구에서 사용하는 차종별 통행시간가치의 원단위는 표 6과 같다.

폭설시 사고에 대한 불편익의 산정은 다음과 같다. 교통사

표 5. 차종별 차량운행비용 회귀계수 및 결정계수

구분	승용차	트럭	버스
a	-6.2504	-9.0018	-12.6196
b	0.0644	0.1183	-0.1400
c	-0.0002	-0.0004	-0.0005
d	338.1883	426.8946	564.5806
R ²	0.9957	0.9962	0.9981

표 6. 차량 1대당 평균 통행시간가치 (수도권: 2008년 기준)

구분	승용차		버스		화물차		철도(1인당)	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무
재차 인원(인)	0.226	1.104	1.509	12.711	1	0	0.08	0.92
시간가치(원)	19,494	6,375	10,705(1인)	3,177	17,343		19,494	3,903
시간가치(원/대렘Đ)	4,213	6,726	19,708	38,591	17,343		1,560	3,591
평균시간가치(원/대)	11,450		61,025		17,346		5,940	

주: 1) 수단별 통행목적 비율의 경우 예비타당성지침5판(2006년 서울시 가구통행실태조사)참고.

2) 수도권 5차 자료의 경우 수단별 통행목적비율이 조사되어 있지 않음.

3) 소비자물가지수를 이용하여 2008년 자료로 보정

자료: 수도권교통본부, 『수도권 장래교통 수요예측 및 대응방안 연구』, 2009. 2.

표 7. 폭설시 교통사고 발생비율

구분	km당사고건수	1억대·km당 사망지수	1억대·km당 부상지수
발생비율	7.01	6.24	779.34

주: 1) 경찰청, 『교통사고통계』, 2008와 도로교통안전관리공단(2003) 및 기상청 홈페이지의 2001년 사고자료를 참고하여 발생비율 선정

고는 교통시스템적인 측면에서 다수의 요인이 복합적으로 작용하여 발생하나, 기초 자료 및 관련 연구의 부족으로 인해 세부 요인별 교통사고 절감 편익을 산정하는데 한계가 있다.

본 연구의 분석기준이 되는 「도로·철도부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구」에 의하면 주행거리(억대·km)별 교통사고 발생비율을 선정하고, 교통사고 비용의 원단위를 이용하여 교통사고 비용을 산정한 후, 사업시행시와 미시행시의 교통사고 비용의 차이를 산출하여 교통사고 비용 절감 편익을 산정하도록 되어있다.

그러나 본 연구는 폭설시 교통사고 비용을 설정하는데 목적을 두기 때문에 현재 수집이 가능한 폭설 교통사고 자료를 토대로 교통사고 절감 편익 산정을 수행하였다. 표 1에서와 같이 2001년 826 mm의 적설량을 보인 서울시의 사고현황자료를 이용, km당 사고발생비율을 조정하여 교통사고 비용을 산출하였다.

분석의 결과, 반포로 구간 5 km에 대하여 Snow Melting System을 설치하였을 경우에 2011년 80.28억원, 2021년 87.34억원, 2031년 86.94억원(경상가격)의 편익이 산출되었으며, 설치비용 및 유지관리비용(40년)⁴⁾산출결과는 각각 988.4억원, 677.4억원(경상가격)으로 분석되었다.

경제성 분석을 위하여 각 비용과 편익을 5.5%의 할인율을 적용하여 2011년 기준의 불변가격⁵⁾으로 환산한 결과 1,199.2억원의 비용과 1,314.9억원의 편익이 산출되는 것으로 분석되었다. 따라서 경제성분석결과 B/C가 1.096, NPV 115.7억원, IRR이 6.38%로 분석되어 경제성적 타당성이 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 폭설시 교통시설 투자사업의 시행으로 계량화가 가능한 통행시간 감소편익, 운행비용 절감편익, 사고비

⁴⁾Snow Melting System의 Heating Cable 내구연한은 40년으로 가정함

표 8. 편익산정결과

연도	통행시간 절감편익	운행비용 절감편익	교통사고 감소편익	총편익
2011	45.54	27.21	7.53	80.28
2016	46.06	29.31	8.65	84.02
2021	47.17	30.95	9.22	87.34
2026	47.38	31.26	9.67	88.31
2031	47.23	30.61	9.10	86.94

표 9. Snow melting system 설치비용 및 유지관리비용

구분	비고	가격	
설치 비용	M. I Heater Cable : Copper Sheath	1Core 600V Grade, HDPE Jacket / 아스팔트, 콘크리트 겸용	100,000원
	M. I Heater Cable : Aluminium Sheath	1Core 600V Grade, HDPE Jacket / 아스팔트, 콘크리트 겸용	90,000원
	Cold Section (Type A)	6SQ(2M 기본, 2중 피복 Shield/콘크리트용)	300,000원
	Cold Lead Wire	6SQ (Shield / 콘크리트용)	20,000원
	Cold Section (Type B)	6SQ(2M 기본, 2중 피복 Shield/아스팔트용)	325,000원
	Cold Lead Wire	6SQ (Shield / 아스팔트용)	25,000원
	Snow Detector & Controller	-	1,600,000원
	Mounting Band	KMIC - MB	22,500원
유지관리비용	월 평균 강설일수 15.4일/하루 평균 10시간 열선가동	288,000원/년	

표 10. 경제성 분석 결과 요약

(단위: 억원, %)

구분	할인비용	할인편익	B/C	NPV	IRR
경제성 분석결과	1,199.2	1,314.9	1.096	115.7	6.38

용 감소편익만을 분석에 반영하였다. 간접편익항목인 도로 이용자의 안전성 및 쾌적성은 화폐가치화 하는데 어려움이 있을 뿐 아니라, 선행연구의 부족으로 인하여 편익항목에 포함시키지 않았다. 향후 연구에서는 폭설 정도에 따른 제설작업, 이로 인한 사회전반에 걸친 비용절감편익, 정시성 편익 등을 포함하여 계량화된 수치분석을 진행할 계획이며, 이는 본 연구에서 수행한 용설시스템의 도입에 더욱 논리적인 타당성을 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

일반적으로 극한의 강설이나 강우는 침두시 교통흐름에 영향을 주며, 정체를 유발한다. 사회 인프라 측면에서도 시설의 훼손을 유발하므로 유지보수와 관련한 비용을 야기하며, 또한 안전측면에서의 피해비용도 심각하다. 그러나 이러한 사회적 비용손실을 기후변화에 대한 일반화 비용으로 계산하는 것은 쉽지 않다. 기후변화에 대한 손실을 계산하는 방법은 물론,

완화시키고, 적응시키는 비용의 산출방법에 대해서 연구자들 별로 상이한 기준을 제시하고 있기 때문이다.

그러나 인구밀도가 높은 지역, 특히 도심부에서는 예측할 수 없는 기후조건이 교통시스템의 운영에 영향을 미치게 되며, 도시운영을 마비시킨다. 따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 교통부문의 사회경제적 손실비용을 산정하였으며, 방재시설물의 설치에 관한 경제성분석을 통해 도시의 안정적인 운영을 도모하는데 최종 목적을 두었다.

폭설에 따른 용설시스템 도입의 편익을 산정하기 위해 RV법, PV법, Select Link Analysis를 이용하여 영향권을 설정하였으며, 시스템 설치구간인 반포로의 경우에는 이용자의 상당수가 강남구, 서초구, 용산구, 중구 및 종로구로 나타났다. 대상링크를 중심으로 용설시스템을 도입하였을 경우는 도입하지 않았을 때 보다 해당 지역의 통행속도가 향상되었을 뿐만 아니라, 반포로 주변의 직접적인 차량 지체도가 줄어들어 폭설시 교통여건이 좋아진 것으로 나타났다.

한편 경제성 분석을 위하여 각 비용과 편익에 대해 5.5%의 할인율을 적용하여 2011년 기준의 불변가격으로 환산하였다. 그 결과, 1,199.2억원의 비용과 1,314.9억원의 편익이 산출되어 B/C가 1.096, NPV 115.7억원, IRR이 6.38%로 분석되었다. 이와 관련하여 향후과제로 제시한 폭설시 도로 이용자의 정시성 편익 등을 계량화하여 반영한다면 Snow Melting System의 설치에 매우 효과적일 것으로 예상된다.

2006년 현재, 미국에서는 통행의 장애물이 되는 눈과 얼음을 도로상에서 제거하기 위해 연간 도로운영예산의 40%이상을 투입하고 있으며(Special Report 290), Stern Review에 의하면 적절한 대책을 마련하지 않을 경우에 작게는 GDP의 5%에서 크게는 20%까지 손실을 초래하게 될 것이라고 경고한바 있다. 이와 관련하여 기후변화에 따른 강력한 조기대응의 편익은 비용보다 더욱 크게 나타남으로 매우 효과적이라 할 수 있다. 따라서 간헐적으로 발생하는 폭설 등에 대해서 통행저항을 최소화할 수 있도록 첨단 기술의 도입이 매우 중요하며, 본 연구는 이에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

용어설명

1. 통행시간비용

통행시간은 차내시간(IVTT)과 차외시간(OVTT)으로 구성되며, 차외시간의 경우 접근시간, 대기시간, 환승시간을 포함한다. 이를 기반으로 통행목적(업무통행, 비업무통행)과 이용수단에 따라서 통행시간을 비용으로 환산한다.

2. 차량운행비용

교통시설사업 시행 시에 통행거리가 단축되고 통행속도가 증가함에 따라 차량운행비용이 감소되는 효과가 발생한다. 차량운행비용은 통상 고정비와 변동비로 구분된다. 고정비는 차량의 감가상각비, 보험료 및 제세공과금으로 구성되고, 변동비는 유류비, 엔진오일비, 타이어 마모비, 유지관리비 등으로 구성된다.

3. 사고비용

교통사고비용은 교통사고로 발생된 모든 경제적 손실을 부담주체와는 상관없이 화폐가치로 환산한 것이다. 교통사고비용에는 의료, 피해자의 생산손실, 물질적 피해, 정신적 피해, 경찰 및 보험회사의 교통사고 처리비용과 법적인 문제가 야기된 경우의 법정비용 등 행정비용이 포함된다.

4. Select Link Analysis

EMME/2, EMME/3에서 이용되며, 노선배정(Traffic Assignment, 또는 통행배정)을 통해 특정 링크를 통과하는 매트릭스(matrix) 형태의 기종점 통행량(O/D, Origin-Destination)을 분석한다.

5. VDF (Volume-Delay Function)

통행배정시 개별 통행자는 각자의 통행비용을 최소화하는 경로를 선택한다고 가정한다. 도로 이용자의 통행비용은 '일반화 비용', 즉 시간비용과 요금으로 나타낼 수 있다.

6. 통행시간가치 (Value of Travel Time)

교통서비스를 이용하는 사람이 통행할 때, 통행시간 단축을 위하여 지불하고자 하는 금전적 가치로 말할 수 있다. 평균 통행시간 절감 또는 한계, 통행시간 절감, 통행목적, 교통수단 등에 따라 상이한 값을 가질 수 있는 상황을 모두 포함한다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-09-NH-02] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

수도권교통본부 (2009) 수도권 **장래교통 수요예측 및 대응방안 연구**

정한우, 최승안, 김형수, 심명필, 박건 (2004) 치수사업에 따른 교통두절피해 절감편의 산정에 관한 연구, **한국수자원학회 2004년도 학술발표회**, pp.771-776

조남건 (2008) 기후변화에 대응하는 선진교통정책의 동향, **국토 2008년 6월호(통권320호)**

조윤호, 김지원, 강성철, 이동현 (2003) 겨울철 도로 사용자 안전 확보를 위한 제설/융설 시스템 소개 **대한토목학회지** 제51권 제12호

한국개발연구원 (2009) **도로철도 부분사업의 예비타당성조사 표준 지침 수정 보완연구(5판)**

한규일, 조동현, 이안호 (2006) 시험선로 결빙방지를 위한 융설시스템에 관한 연구, **한국동력기계공학회지** 제10권 제1호

Committee on Climate Change and U.S. Transportation, National Research Council (2006) **Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290**

David Jaroszweski, Lee Chapman, Judith Petts (2009) **Assessing the potential impact of climate change on transportation: the need for an interdisciplinary approach**, Transportation Research Part D 14, pp.205-221

Hensher, D.A., Button, K. (2003) **Handbook of Transport and Environment**, Elsevier, Amsterdam.

Lee Chapman (2007) **Transport and climate change: a review**, Journal of Transport geography 15 354-367

Mark J. Koetse, Piet Rietveld (2009) **The impact of climate change and wether on transport: An overview of empirical findings**, Transportation Research Part D 14, pp.205-221

Stern, N.(2007), **The Economics of Climate Change: The Stern Review**, Cambridge University Press, Cambridge

- ◎ 논문접수일 : 10년 04월 13일
- ◎ 심사의뢰일 : 10년 04월 13일
- ◎ 심사완료일 : 10년 04월 22일