GIS 기반 철도 위험물 최적수송경로도출 표준화에 관한 연구

팽 정 광* · 김 시 곤* · 박 민 규* · 강 승 필**
*서울산업대학교 철도경영정책학과 · **서울대학교 건설환경공학부

A Study on Standardization of Optimum Transportation Routing based on GIS for Railway HAZMAT Transportation

Jung goang Paeng* · Si gon Kim* · Min kyu Park* · Seung pil Kang**
*Department of Railroad Management & Policy, Seoul National University of Technology
**Department of Civil & Environmental Engineering Seoul National University

Abstract

The types and quantities of Hazmat and Hazmat transportation are gradually increasing, keeping pace with industrialization and urbanization. At present the safety management for Hazmat transportation only considers reducing accident probability, but even when an accident involving Hazmat-carrying vehicles occurs, that is not regarded as a Hazmat-related accident if the Hazmats do not leak out from the containers carrying them. Thus the methods to reduce risk (Risk=Probability×Consequence) have to be developed by incorporating accident probability and consequence. By using Geographic Information System (GIS), a technical method is invented and is automatically able to evaluate the consequence by different types of Hazmat. Thus this study analyzed the degree of risk on the links classified by the Hazmat transport pathways. In order to mitigate the degree of risk, a method of 7-step risk management on Hazmat transportation in railway industries can be suggested. (1st step: building up GIS DB, 2nd step: calculating accident probability on each link, 3rd step: calculating consequence by Hazmat types, 4th step: determination of risk, 5th step: analysis of alternative plans for mitigating the risk, 6th: measure of effectiveness against each alternative, and 7th step: action plans to be weak probability and consequence by the range recommended from ALARP). In conclusion, those 7 steps are used as a standardization method of optimum transportation routing. And to increase the efficiency of optimum transportation routing, optional route can be revise by verification.

Keywords : Hazmat, GIS, Transportation, Risk Management, Railway

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

첨단 기술의 발전과 산업화·도시화는 위험물의 양과 종류의 증가를 가져왔고, 더불어 위험물 수송도 증가하고 있다. 현재 위험물은 약 10만 종류가 넘고 매년 새로운 위험물이 생겨나고 있지만 아직까지 위험물 수송 체계에 대한 효율적 관리가 이루어지지 않고 있다.

위험물 수송은 단지 국내 문제만이 아니라 국제적인 관심사로 다루어지고 있으며, 위험물 수송과 관련하여 국제협정이 일반화되어 있는 상태로 우리도 이러한 국제적 협정에 따라 관련 규정을 준수하고 있다.

최근에 발생한 이란과 북한의 철도 위험물 수송 사고로 인해 위험물 철도 수송의 위험도 평가는 전 세계적인 관심을 가져왔다.

† 교신저자: 팽정광, 서울시 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 구도서관 216호 철도경영정책연구소
M · P : 016-9899-2508, E-mail : jgpaeng@hanmail.net
2009년 10월 9일 접수; 2009년 10월 15일 수정본 접수; 2009년 10월 20일 게재확정

이 두 사고로 인해 이란에서는 328명의 사망자와 460명의 부상자가 발생했고, 북한에서는 161명이 사망하고, 1300명이 부상하는 대규모 피해가 발생하였다.

이러한 열차 사고의 치명적인 위험에도 불구하고, 위험물 수송 안전에 관한 연구는 대부분이 열차 선적에 집중되었고, 이러한 열차 사고발생 건수 저감을 위한 연구에 집중되어 있다.[1] 하지만 이러한 단순한 발생 건수의 저감으로는 철도 안전정책의 선택과 실행에 있어 실질적인 위험도 저감이라는 측면에서는 한계가 분명히 존재하였다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해 사고발생확률과 피해노출규모를 감안한 위험도 관리절차를 활용하여 위험물 최적수송경로를 도출하도록 하였다. [2][3]

따라서 본 연구에서는 위험물 수송 수단 중 철도 수송에 있어 경로의 링크별 위험도를 분석하고, 이러한 위험도를 낮추기 위한 대책으로 GIS에 기반한 7단계 표준화 방안을 시행함으로써 철도 위험물 수송을 위한 최적 수송경로를 도출하고자 한다.

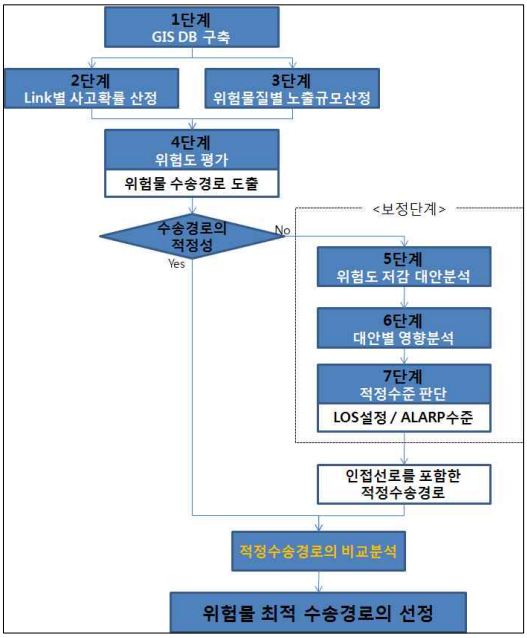
1.2 연구의 범위 및 추진절차

본 연구에서는 2008년에 발생한 철도 사고 및 장애 현황을 범위로 선정하며, GIS에 기반한 링크별 위험물 수송 위험도를 도출하기 위해서 2008년 1월부터 6월까지의 열차사고 및 운행장애를 GIS DB로 활용하였다.

이러한 위험도 관리 절차는 위험도를 최소화할 수 있는 수송경로를 도출하고, 도출된 수송경로가 현실적 운영이 어려울 경우 인접노선 등에 대한 위험도 저감 대안을 마련하고 그 영향을 평가한 후 대안의 시행 전과 시행 후의 수송경로를 비교하여 최적 수송경로를 도출한다. 아래에서 제시한 7단계 수송안전 관리 방안을 바탕으로 철도 위험물 최적수송경로를 도출을 위한 표준화 절차를 마련하였다. <Figure 1>의 1~4단계가 1차로 경로를 도출한 것이고, 5~7단계는 1차로 도출된 경로를 보정하는 단계이다.

2. 철도사고 특성 및 활용

현재 위험물 수송은 일반열차 운행노선과 일반열차로 국한되어 있다. 일반적으로 철도사고의 위험도를 산출하기 위해서는 사고 유형을 세분화하여 충돌, 탈선, 화재 사고 등이 변수로 활용될 수 있다. 이러한 변수 중 사망, 부상 등의 인적 사상사고는 위험도 도출에 필수적인 변수가 되어야 하지만, 발생빈도가 극히 적어서 링크별 상대적 위험도 산정이 왜곡 또는 과장될 우려가 있으므로, 링크별 분포도가 일정 수준 이상인 철도사고와 운행장해를 유발하는 인명사고가 링크별 상대적 사고 위험도를 대변한다는 가정 하에 위험도 산정 변수로 활용하고자 한다.



<Figure 1> Method and procedure of this research

<Table 1> numbers and death of Railway Accidents in 2008

			Accidents	Death	etc
Accidents	traffic-person-accident	public	105	80	
		passenger	127	63	
		staff	19	6	
	safety-person-accident	public	13	4	
		passenger	30	2	
		staff	82	0	
	train-accident	collision	2	0	
		derailment	5	0	
	railway traffic accident-railway crossing		24	4	
	railway safety accident-fire		1	0	
	sub-total		408	159	
Obstacle	dangerous-obstacle		4	0	
	delay-obstacle		292	0	
	소계		296	0	

<Table 1>의 2008년도의 철도사고 현황을 살펴보면, 총 408건이 발생하여 전년도에 비해서는 4.9% 감소한 것으로 나타났다.[4] 이 중 열차 충돌 2건, 탈선 5건이 발생하였으나 사망자는 발생하지 않았다. 특히 건널목 사고는 인명과 승용차의 간섭을 수반하여 위험물 수송 열차에 치명적 사고 위험을 증가시킬 수 있는데, 총 28건이 발생하였고 지속적인 건널목 입체화 사업 등의 사업을 시행하고 있지만 전년도와 동일한 건수가 발생하였다. 전반적으로 열차사고의 감소에 따라 인명사상 사고의 발생건수도 감소하였으며, 이 중 열차를 직접 이용하는 여객 사상사고가 38.5%, 일반 공중의 사상사고가 28.9% 등 철도 비종사자의 인명사상사고가 대부분을 차지하고 있었다.

특히 사상사고는 열차의 비상 정지 등 이례적인 상황을 수반할 수 있다. 예컨대 위험물 수송 열차의 비상 정차, 열차 충격에 의한 화물손상 등을 감안했을 때 위험물 수송 열차의 비정상적 운행요인을 유발하므로 수송 위험도에 매우 큰 영향을 끼칠 수 있는 중요하고 현실성 있는 변수로 선택하였다.

3. 위험도 평가 모형 선정

일반적으로 위험도 평가를 위해서는 세 가지 모형이 활용된다.[5]

우선 단순수치 지표법(Enumerative Indices)은 위험물 사고의 발생가능 근원을 화학공장, 위험물 보관소 등으로 나누고, 사고발생시 피해의 규모를 인구밀집, 위험물수송수단, 위험물 종류 등으로 구분하여 순위를 매겨서 위험도를 계산하는 가장 단순한 방법이다. 하지만 정확도 측면에서는 다른 모형에 비해 상대적으로 떨어지는 단점이 있다.

다음으로 회귀분석법(Regression Models)은 일일평균교통량, 철도 사고량, 철도 및 선로의 종류 등을 독립변수로 하여 종속변수인 위험도를 계산하는 방법이므로 본 연구에서 위험도를 평가하는 궁극적인 목적이 위험물 최적 수송 경로 선정인 만큼 철도 운송횟수, 철도 사고량 등을 변수로 하는 회귀분석법이 가장 타당한 것으로 판단되어 이를 적용한다.

마지막으로 확률적 위험평가법(Probabilistic Risk Assessment Models)은 위험물 사고확률과 사고발생시 피해규모를 조건부 확률(Conditional probability)의 개념을 적용시켜 위험도를 평가함으로서, 가장 정확한 위험도 평가가 가능하지만 활용되는 기초자료의 획득에 어려움이 있어 본 연구에 적용하기 곤란하다.

3.1 위험도 평가 모형 개발을 위한 전제조건

3.1.1 일반전제

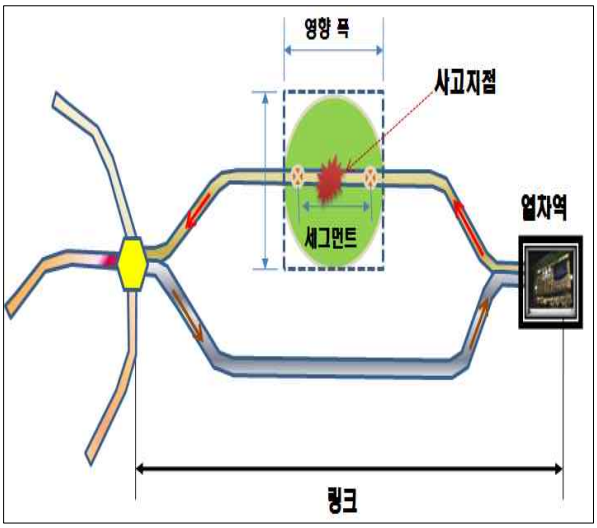
일반적으로 위험물의 소비 프로세스(Process)는 「생산→저장→수송→저장→소비」의 5단계를 거친다. 본 연구에서 철도 위험물 수송에 의한 위험도 분석이란 철도 선로를 통하여 함위험물을 운반할 때 야기되는 위험도에 국한하고 있으므로 제시하고자 하는 위험도 분석 모형은 위험물을 적재, 하역 시의 각종 위험물 사고에 포함하지 않는다. 또한 링크별 위험물 철도 차량과 열차가 수반하는 절대적 위험도를 규명하는 것은 현실적인 문제로 어렵기 때문에 상대적으로 링크별 위험 정도를 구분하는 상대적 위험도를 제시하고자 하였다.

3.1.2 피해노출규모(C) 산정을 위한 전제

사고 발생 시 피해규모는 풍향, 지형에 따라 달라지나 일반적으로 위험물질이 미치는 영향폭을 감안하여 원내 포함된 인구, 건물, 환경으로 대체하였다.

또한 계산을 단순화하기 위해 원면적 대신 피해영향폭을 제곱한 정사각형의 면적으로 대체하였고, 피해 영향폭은 위험물질별로 상이하므로 미국에서 활용하고 있는 「위험물 잠재 영향지역」에서 정의하고 있는 수송량이 가장 많고 빈번한 폭발물(Explosives)을 가정하여 2Km로 가정하였다.

<Figure 2> Process of HAZMAT Consumption



<Figure 3> Terminology used in the risk assessment model

<Table 2> Potential Impact Area by HAZMAT[6]

HAZMAT	Impact Area	etc
Explosives (EXP)	1.6 km (1.0 mi.)	all directions
Flammable Gas (FL)	0.8 km (0.5 mi.)	all directions
Poison Gas (PG)	8.0 km (5.0 mi.)	all directions
Flammable/Combustible Liguid (FCL)	0.8 km (0.5 mi.)	all directions
Flammable Solid, Spontaneously Combustible, Dangeraous when Wet	0.8 km (0.5 mi.)	all directions
Oxidizer/Organic Peroxide	0.8 km (0.5 mi.)	all directions
Poisonous, not gas	8.0 km (5.0 mi.)	all directions
Corrosive Material	0.8 km (0.5 mi.)	all directions

3.2 위험도 평가 모형

미국의 연방교통국(US DOT)에서는 '위험물 운반을 위한 노선지정 지침서(Guidelines for Applying Criteria to Designed Routes for Transportation Hazardous Material)'를 제시하고 있다. 이 지침서에서는 대안노선별로 개별 위험도를 산정하기 위해 FHWA 위험도 분석 모형(Urbanek Model)을 설명하고 있으며, 선로의 기하구조, 교통량, 인구밀도, 토지이용 등의 조건을 반영하여 위험도를 도출하도록 하고 있다. 특히 위험물 수송 시 예상되는 위험도는 크게 위험물 수송 열차의 사고, 특히 위험물 누출을 수반하는 사고발생확률(Probability)에 비례하고, 동시에 사고발생 지점에서의 피해노출규모(Consequence)에 비례한다. 즉, 위험도는 사고발생확률에 피해노출규모를 곱함으로써 구할 수 있다.

회귀분석법에 따라 도출한 위험도(Risk)는 실제로 사고발생확률과 피해노출규모를 정확히 계산하는 것은 어렵기 때문에 절대 위험도 모델이 아닌 상대 위험도 모델을 적용하였다.

$$\text{위험도}(R) = \text{사고발생확률}(P) \times \text{피해노출규모}(C) \quad (1)$$

3.2.1 사고발생확률(P)

사고발생확률을 도출하기 위해서 최근에는 FHWA 위험도 분석 모형(Urbanek Model)을 개정하여 새로운 모형식인 MRI Model를 제시하고 있다. 이 모델에서는 위험물 수송 열차의 사고발생확률(P)은 열차운행 횟수와 링크길이에 영향을 받는 것으로 설명하고 있다. 다시 말해서, 단위 길이당 열차사고발생확률 $HTAR_i$을 구하고 사고발생 시 위험물 노출가능성을 감안한다면 사고발생확률은 아래의 식 (2)와 같이 표현 될 수 있다. 단, 실제 위험물 수송 화물열차의 사고발생 건수는 파악하기 어렵기 때문에 일반 화물열차의 사고 발생 현황을 적용하였다.

$$P(R)_i = HTAR_i \times P(R/A)_i \times L_i \quad (2)$$

여기서,
- $P(R)_i$ = 링크 i에서 위험물 수송열차가 야기하는 사고발생확률
- $HTAR_i$ = 링크 i에서 위험물 열차의 사고발생확률 (accident veh/veh · km)
- $P(R/A)_i$ = 링크 i 에서 열차사고 시 위험물 누출확률
- L_i = 링크 i 의 길이(km)

3.2.1.1 위험물 열차의 사고발생확률(HTARi)

열차 사고발생확률은 위험물 사고발생확률을 결정하는데 가장 중요한 값으로, 이 값은 주어진 링크에 위험물 열차 사고량, 위험물 열차 운행횟수 등에 기초하여 구할 수 있다.

$$HTAR = \frac{Number\ of\ Hazmat\ Train\ Accidents_i}{TADT_i \times Hazmat\ Train\ Ratio_i \times 365 \times Years \times L_i} \quad (3)$$

여기서,
- $HTAR_i$ = 링크 i에서 위험물 열차의 사고발생확률
- $Number of Hazmat Train Accidents_i$ = 링크 i에서 위험물 철도사고 발생건수
- $TADT_i$ = 링크 i에서 일일 열차 교통량
- $Hazmat\ Train\ Ratio_i$ = 링크 i에서 위험물 철도운송비율
- 365 = 활용된 자료의 기간에 대한 일수
- $Years$ = 활용된 자료의 기간에 대한 년수
- L_i = 링크 i의 길이(km)

3.2.1.2 열차사고 시 위험물 누출확률($P(R/A)_i$)

일반적으로 열차사고발생 시 위험물이 누출하는 확률은 사고마다 다르겠지만, 해당 선로 및 지역별로 그룹핑(Grouping)하였고 이러한 확률을 반영하기 위하여 과거 사고기록 데이터에 기초하여 열차 선로의 링크별로 위험물 누출확률이 구해질 수 있다. 실제 미국의 경우 $P(R/A)_i$와 Li 값으로 도로 종류별로 일정한 값을 사용하고 있다.

하지만 아직 국내에서는 이러한 위험물 누출확률과 관련한 연구는 미흡하여 실제로 위험물 수송사고가 발생했을 때 위험물은 누출된다는 가정 하에 본 연구를 수행하였다.

<Table 3> Releas Probability of HAZMAT by truck transportation

Area	Road Type	probabilities of Release	Proportion of Release Accidnet (million-mile)
Rural road	2 lanes	0.086	0.19
	non-division multi-lane	0.081	0.36
	division multi-lane	0.082	0.18
	express highway	0.090	0.06
Urban road	2 lanes	0.069	0.60
	non-division multi-lanes	0.055	0.77
	division multi-lane	0.062	0.77
	one-way road	0.056	0.54
	express highway	0.062	0.14

※ 자료 :Midwest Research Institute

3.2.2 피해노출규모(C)

위험물 열차사고로 인한 위험물 노출 시 피해노출규모는 사고발생시점과 장소마다 다를 수 있다. 예컨대 중심상업지구 등의 도심지역에서는 인구 및 건물 등이 피해에 많이 노출되고 산악지역에서는 인구 및 건물 등이 거의 노출되어 있지 않다. 또한, 위험물 열차 사고 시 누출되는 위험물의 량에 따라서 피해가능 규모가 달라질 수 있다.

이러한 사실들을 모두 모형으로 나타내기가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 제안되는 모형은 상대적 위험도를 평가하기 위한 모형이다. 따라서 피해가능 규모는 단지 위험물질별로 영향을 미칠 수 있는 범위 내에 속하는 즉, 피해 가능한 인명 및 물질의 노출량으로 정의하였다. 구체적으로, 본 연구에서는 인구노출량과 환경노출량을 피해가능 규모를 측정 기준으로 선택하였다. 이를 바탕으로 정리하면 아래와 같이 세 종류의 노출 규모를 감안할 수 있으며, 노출 규모는 사고 발생 시간과 위험물 유형에 따라 달라진다.

<Table 4> Consequences considered in this study

	Accident time	
	Daytime	Nighttime
Population exposure	Daytime (Employment population)	**Nighttime (Residential population)**
Property exposure	Depends on Land Use: Residential Areas, Commercial Areas,etc.	
Environmental exposure	**Rivers, Reservoirs,** Wildlife Areas, etc.	

3.2.3 위험도 계산

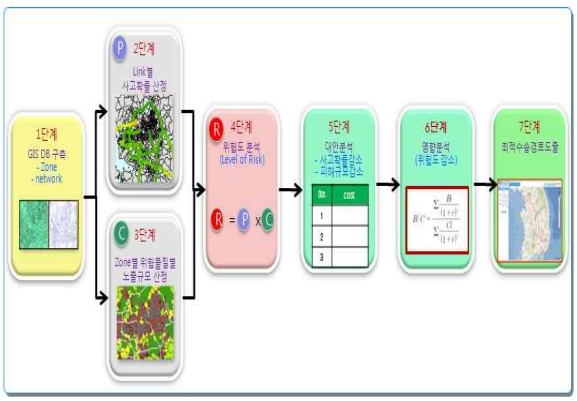
각 링크별로 사고발생확률과 피해노출규모가 정해지면 이를 곱하여 링크별 상대적 위험도를 구할 수 있으며, 사고발생확률은 모두 같지만 피해가능 규모는 링크별로 크게 인구와 환경으로 구분할 수 있다. 실제로 링크별 위험도를 구하기 위해서는 링크별로 일일열차 운행횟수, 열차사고 발생건수, 사고발생시 위험물 누출확률, 링크주변의 노출확률은 인구와 환경 노출 등으로 구분하여 구해야 한다. 하지만, 많은 경우 자료를 쉽게 구할 수 없을 뿐만 아니라 존재하더라도 극단적인 값일 경우 위험도 값을 왜곡시킬 수 있으므로, 이런 경우를 대비하여 철도 노선, 지역특성별 대표 값을 활용하도록 하였다.

4. GIS기반 철도 위험물 수송 위험도 관리 7단계 표준체계 구축

철도 위험물 수송 위험도 관리 표준체계를 구축하기 위해 지리정보시스템(GIS)이 기반이 되는 이유는 위험물질별로 달라지는 노출범위(규모)를 자동적으로 계산하는 버퍼(Buffer) 기법 등의 활용이 가능하기 때문이며, 만약 GIS를 사용하지 않고 수작업으로 수행할 경우에는 많은 노동과 비용이 소요된다.[7]

4.1 철도 위험물 수송 경로의 도출(1~4단계)

본 연구에서 언급하고 있는 위험물 수송 표준관리체계는 향후 SOC 건설, 비상대응 계획 등의 계획용으로 활용될 수 있으며 운영기관에서 최적운행노선의 결정이나 위험도 저감 대안 선정에 활용될 수 있다. 이러한 관점에서 철도 위험물 수송 7단계의 표준화 절차를 이용하여 최적 수송경로를 도출할 수 있다.



<Figure 4> Seven steps for Hazmat safety management

4.1.1 GIS DB 구축(1단계)

GIS DB는 위치정보와 속성정보로 구성된다. 위치정보는 지리적 공간형상으로 정의하는 순서를 가진 단순좌표로서 2차원 또는 3차원으로 구성된 점, 선, 면의 형태로 정의되며 점, 선, 면간의 상호연관성 및 인접성 등은 위상으로 정의될 수 있다. 속성정보는 점, 선, 면으로 표현되는 형상의 관련 정보로서 문자, 숫자, 영상으로 표시된다.

4.1.2 링크별 사고발생확률 산정(2단계)

위험물 수송 열차의 사고발생 확률은 단위 길이 당 열차사고발생률을 구하고 사고발생 시 위험물 노출가능성을 감안한다면 사고발생확률은 위의 식 (2)에서 구할 수 있다. 교통안전공단 철도안전정보시스템의 철도사고통계 중 철도사고 발생건수, 운행횟수 등의 자료를 참고로 하였고, 이를 통해 GIS 속성자료로 활용하기 위해 각 해당 자료를 입력하였다. 이때 활용된 자료는 링크별 사고발생지점, 열차사고발생률, 일일 열차 교통량 등을 GIS DB 구축을 위한 속성 정보로 확인하였다.

4.1.3 위험물질별 피해노출규모 산정(3단계)

위험물질별 피해노출 규모를 산정하기 위해 철도 네트워크에서 3,572개 존의 인구밀도에 대한 링크별 인구노출 규모와 저수지 및 강에 대한 환경노출 규모를 구분하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

<Table 5> Example of GIS DB

	Location Data
Point	Accident point, Infra, Station
Line	Railway line
Polygon	administrative district(3,572 zone), Rivers, Reservoirs

<Table 6> Objects to estimate Consequences by Hazmat types

	damage objects
Population Exposure	- Population scale available damage
	- daytime (Employment Population) - Nighttime (Residential Population)
Environment Exposure	- Environment scale available damage
	- Methods to give additional burdens by classifying major environmental issues and general environmental issues

4.1.3.1 인구노출규모

GIS 공간분석을 통하여 위험물 수송에 의한 인구노출규모를 산정할 수 있으며, 통계청 국가통계포털(KOSIS)의 “2007 인구통계”자료를 분석하고 Arcview Table Join 기법을 통하여 인구밀도와 Zone의 인구통계자료를 구축할 수 있다.

4.1.3.2 환경노출규모

철도망에서의 위험물 수송에 의한 환경노출규모 산출은 Arcview Field Calculator를 이용하여 산출 할 수 있다. 이것은 환경노출규모의 최소단위를 링크단위로 구분하여 그 값들을 최종 철도망의 링크별 환경노출규모로 표출이 가능하다.

4.1.4 위험도 평가(4단계)

위험도(R)는 단순히 사고발생확률(P)에 피해노출규모(C)를 곱하는 것으로, 이 함수를 Arcview에서 구현하여 인구노출 위험도 및 환경노출 위험도를 철도 노선에서 분석하여 표출한다. 이러한 위험도에 기반하여 위험물 철도 수송의 최적노선을 도출할 수 있다.

4.2 수송경로 보정(5~7단계)

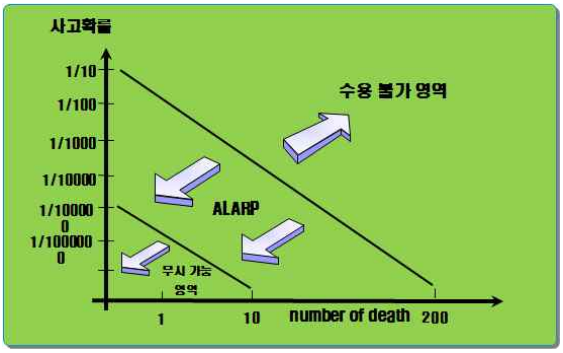
1~4단계를 거쳐 도출된 철도 수송 노선이 현실성이 낮을 경우 인접선로의 위험도를 낮추는 방안을 강구하여 최적수송경로를 보정할 수 있다. 이를 위해 위험도 저감 대안을 분석하고, 대안별 영향과 타당성을 검토하여 보정된 최적 수송경로를 도출할 수 있다.

4.2.1 위험도 저감 대안분석(5단계)

위험물 철도 수송 시 위험도 감소를 위해서는 앞에서 살펴본 함수와 같이 사고확률 감소 대안과 피해규모 감소 대안을 선정한다.[8] 앞에서 살펴 본 철도사고의 특성에 따라 사고확률을 감소하기 위해서는 위험도 사고를 유발할 수 있는 철도장애의 원인이 되는 공중사상사고와 건널목 사상사고에 대한 예방대책을 마련하는 것이 효율성이 높은 것으로 판단된다.

4.2.2 영향분석(6단계)

위험도 감소 대안별 영향분석은 영향 평가의 객관성 유지와 평가 방법의 현실화를 고려하여 균일한 척도로 비교가 가능한 비용편익분석(Benefit Cost Analysis)을 이용한다.[9] 비용편익비가 1보다 클 경우 투자의 효과가 있는 것으로 보며, B/C비가 큰 대안일수록 사업 우선성이 있다고 볼 수 있다.



<Figure 5> Establishment of ALARP Level

4.2.3 타당성 검토(7단계)

철도사고 위험도 감소를 위한 대안의 영향분석은 ALARP이 허용하는 범위까지 수행될 수 있다. 이때의 ALARP은 서비스수준(Level of Service)과 유사한 개념으로 사회적으로 합의된 임의의 가치로 볼 수 있으며 더욱 낮은 값을 갖추도록 해야한다. 특히 유럽 각국에서는 철도운영환경에 따라 영국ALARP, 프랑스 GAMAB, 독일 MEM 등 위험도 평가에 기반한 적절한 안전관리 원칙을 적용하고 있다. 이 중 영국철도는 위험도를 평가하여 허용수준 이하로 관리하는데 필요한 안전활동의 문서화 및 승인절차를 Yellow Book이라는 지침으로써 권고하고 있으며, 여기서 안전성을 판단하는 핵심원칙으로서 ALARP을 적용하고 있다.[10] 이러한 해외의 철도안전 활동과 달리 국내에서는 국가수준의 ALARP 범위가 설정되어 있지 않음으로서, 위험물 안전관리를 위한 정책 결정에 어려움이 있다. 따라서 국가수준의 ALARP 범위 설정을 위해서는 법제화를 통한 제도화가 필요할 것으로 판단된다.

5. GIS 기반 철도 위험물 최적수송경로 도출 예시

5.1 개 요

철도 위험도에 기반한 위험물 수송 경로선정 절차에 의하여 GIS를 통한 철도 위험물 최적수송경로의 도출 방안을 마련하였다. Arcview 프로그램에 내재된 버퍼링분석 등을 활용함으로써 시간적, 경제적 편의성을 확보할 수 있다. 그리고 2007년도의 철도 운행횟수 및 사고건수를 대상으로 전국 철도망으로 네트워크를 구성하고, 3,572개의 행정구역별 소존을 구성하였다. 이러한 절차를 통해 주어진 출발지(O)-도착지(D)간 위험물 수송 최적수송경로를 분석하고, 위험도를 저감할 수 있는 대안의 설정과 타당성을 분석하도록 하였다.

<Figure 6> Accidnet point of Railway

5.2 위험도 기반 철도 위험물 최적수송 경로 도출

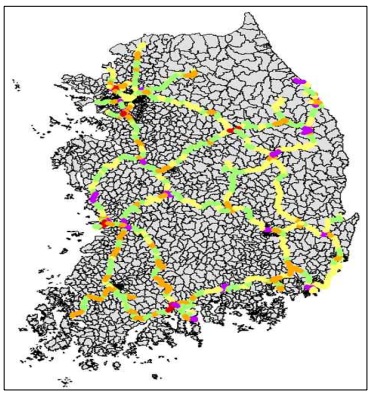
앞에서 제안한 위험물 최적수송경로 도출 표준화 7단계 중 1~4단계를 통해 O-D 경로 상 위험도를 최소화하는 철도 위험물 수송 경로를 도출할 수 있다. 이때 도출된 결과가 비현실적일 때 5~7단계의 보정단계를 거침으로써 최적 수송경로를 도출할 수 있다.

5.2.1 GIS DB 구축

ArcView를 활용하여 점(철도역), 선(철도선로), 면(행정구역, 강, 저수지) 데이터 등의 위험물 관리를 위한 GIS DB를 구축한다. 관련기관의 통계자료를 통하여, 철도운행횟수, 인구밀도, 사고량 등 속성정보를 통해 철도 위험물 최적수송경로 도출을 위한 GIS DB를 구축하였다.

5.2.2 링크별 사고발생확률(P) 산정

위험물 수송 철도망에서의 위험도 분석을 위해 행정구역별 인구밀도를 산출하여 속성자료를 구축할 수 있고, ArcView Tool을 이용하여 사고지점별 사고량, 철도 링크별 교통량을 구한다. 그리고 식 (2)에 따라 사고발생확률을 산출하여 철도망에 도출하였고 그 결과는 다음과 같이 표출된다.



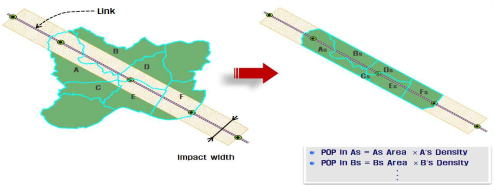
<Figure 7> Accident probability by Railway link

5.2.3 존별 위험물질별 피해노출규모(C) 산정

철도 존별 피해노출규모(C) 산정은 일반적인 계산을 통해서는 도출하기 어렵기 때문에, GIS 프로그램인 Arcview 를 활용하도록 하였다. 이를 위해 전국 행정구역별 인구밀도를 나타낸 GIS shape 파일을 활용하여 해당링크별로 인접지역(Zone of Proximity)을 생성 및 표출하도록 버퍼링 분석(Buffering Analysis) 실행과 버퍼된 면적 값을 기준으로 하여 그에 해당하는 만큼을 제외한 나머지 부분을 삭제하는 중첩 분석(Clip Analysis)을 통해 피해노출규모(C)를 도출할 수 있다.

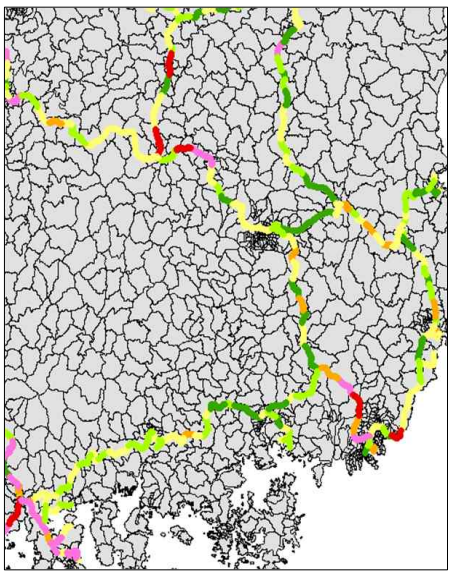
이 두 기능을 통해 ArcView Field Calculator를 이용하여 링크별 사고발생 시 위험 영향을 미칠 수 있는 인구 피해노출 노출규모와 환경 피해노출규모를 산출하여 철도망에 표출할 수 있으며, 본 논문에서는 인구노출 규모에 대한 위험도를 예시로 한다.

(a) Buffering Analysis



(b) Clip Analysis

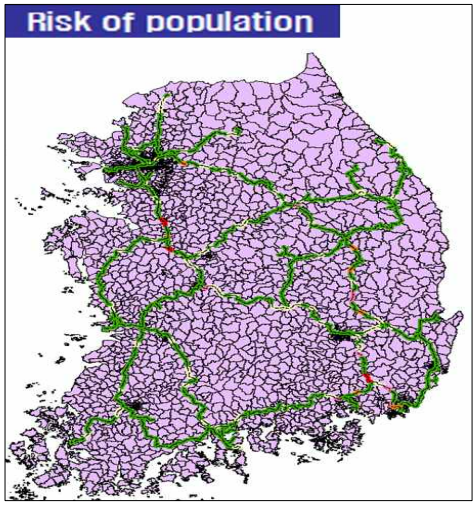
<Figure 8> Buffering & Clip Analysis



<Figure 9> Population Consequences by Railway link

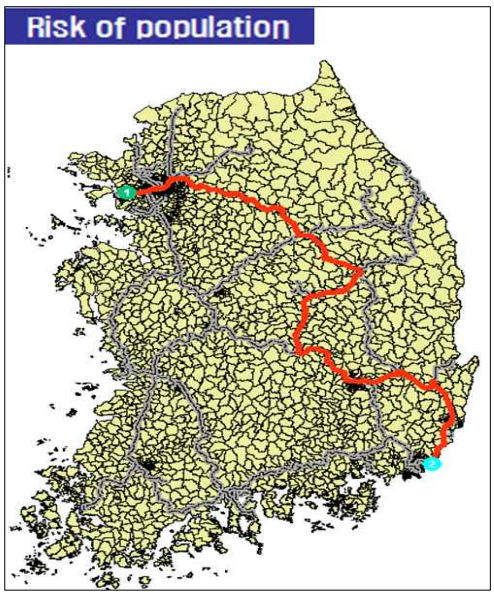
5.2.4 위험도(R) 분석을 통한 철도 위험물 수송 최적경로 도출

위험도는 사고발생확률과 노출규모의 곱으로 구하고, 이 함수를 Arcview에서 구현하여 인구노출 위험도를 철도망에 표출하며 분석한 그림은 다음과 같다.



<Figure 10> Risk Analysis based on by Railway link(Risk of Population)

분석된 인구노출 위험도를 기준으로 GIS의 최적분석 기법을 활용하여 철도 위험물 수송 최적경로를 철도망에 표출할 수 있다. <Figure 11>의 결과와 같이 울산(O)에서 인천(D)까지의 위험물 수송경로를 비교해 보면, 위험도가 높은 대구와 대전-서울 구간을 회피하는 경로가 도출되었다.



<Figure 11> Minimum risk route between Ulsan and Incheon

5.3 최적수송경로 보정

5.3.1 대안분석

철도 위험물 수송 시 위험도 감소를 위해서는 앞에서 살펴본 함수식에서 사고발생확률(P) 감소와 피해노출규모(C)의 감소 대안을 선정할 수 있다. 이러한 위험도 감소 방안을 살펴보면, 선로 직선화, 선로울타리 및 감시설비구축, 지장물 검지 등 첨단보안설비 확충, 선로개량, 구축물 개량 등이 존재한다. 위험물 사고확률 감소를 위해 설정한 각 대안별로 실시 유무에 따른 사고감소 영향을 분석하여 경제성 검토(B/C분석) 자료로 활용할 수 있다. 2006년에 발생한 철도사고로 인한 사회적 비용은 약 476억원으로 추정된다. 사망사고 1건당 31,187만 원의 사고비용이 발생하고 있으며, 사망자 1인당 30,940만 원의 사고비용이 발생한 것으로 추정되었다.

5.3.2 영향분석

철도 시설의 Infra 측면에서 열차사고 및 운행장애를 감소하기 위한 대안별 사고감소 효과를 측정하기 위해 철도안전종합계획[11]과 교통안전연차보고서[12], 교통안전시행계획[13] 등의 관련 자료를 검토한 결과 '선로울타리 및 감시설비 구축'이 59%의 사고감소율을 보여 가장 높았고, 이때의 위험도 상위 구간인 50.4Km 구간에 대한 설치비용은 100.8억 원이 소요되고, 이에 따른 위험도 저감으로 사망자에 대한 편익은 8.88억 원으로 도출되었다. 그 다음으로 선로 직선화로 인해 약 50%의 감소율과 10.8억 원의 편익, 선로개량 및 구축물 개량이 각 35%의 감소율과 7.58억 원의 편익을 나타내었다.

<Table 7> Cost of Railway accidents

		Accident Cost (ten thousand Won)	etc
Death Accident	1 accident	31,187	
	1 person	30,940	

※ 출처 : 2006년 교통사고비용 추정 (KOTI)

<Table 8> Benefit to reduce risk by alternatives

Alt.	Contents	Costs (hundred million)	Reduction Rate(%)	Benefits (hundred million)
Alt.1	to improve lines to straight lines	820	50	10.8
Alt.2	to construct fences and watching equipments	100.8	59	12.8
Alt.3	to expand advanced security equipments	85.6	19	4.12

※ 주 : 일부 대안 시설물에 대한 객관적 사고 감소효과에 관한 자료가 없어 교통안전시행계획 등의 사고통계를 참고로 함

5.3.3 타당성 검토

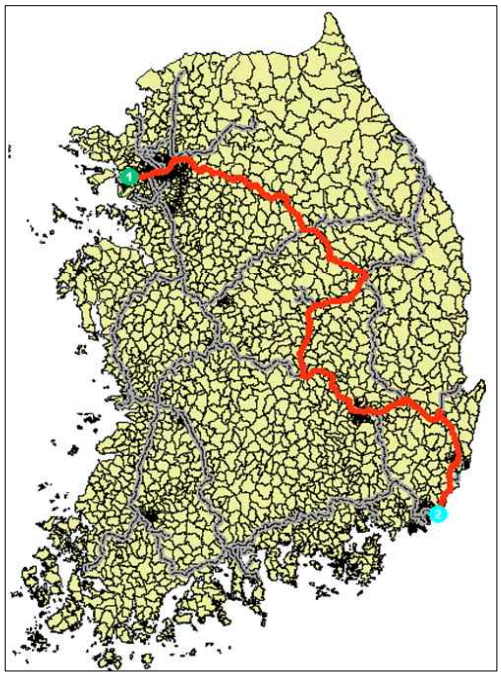
위험도 감소 대안별 영향분석은 일반적으로 경제성 평가에 사용되는 방법인 비용편익분석(Benefit Cost Analysis)을 활용하였다. 일반적으로 편익은 건설 후 20년간 산정되어지고 할인율은 5.5%를 적용하였으며, 각 대안별로 설치비용과 철도사고 사망자 1인당 순평균 비용에 대해 B/C분석을 실시하였다. 그 결과 1보다 높게 나타난 대안은 '선로울타리 및 감시설비 구축'이 1.60으로 나타났고, 다음으로 '구축물 개량(터널 및 교량)'이 1.41로 분석되어, '선로울타리 및 감시설비 구축' 대안이 가장 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

5.4 최적수송경로 보정 결과

1차적으로 산출된 경로가 수송경로로서 적정성이 있다면 그 최적 노선에 대한 위험도 저감 대안을 고려하여 수송 정책을 결정하여 활용할 수 있다. 하지만 운영기관 또는 정책부서의 여건상 수송경로로 부적절할 경우 적정노선의 인접노선에 대한 위험도를 평가하고 도출하여 이에 대한 대안 분석을 실시하고 위험도 및 타당성을 비교· 평가하여 최적노선을 보정할 수 있을 것이다. 이러한 방법으로 본 연구에서 제시하는 7단계 방안의 실용성과 활용성이 극대화 될 수 있다. 1~4단계를 통해 울산(O)과 인천(D)간의 위험물 수송경로는 아래의 그림과 같이 북영천과 영주구간에서의 위험도가 높아 우회하는 노선이 도출되었다. 하지만 이 노선은 인구밀접지역인 대구와 김천을 가로지르고 있어 오히려 더 큰 잠재 위험도를 내포하고 있다고 볼 수 있어 북영천-영주 구간의 위험도 저감을 위한 보정이 필요할 것이다.

<Table 9> Example of B/C analysis by alternatives

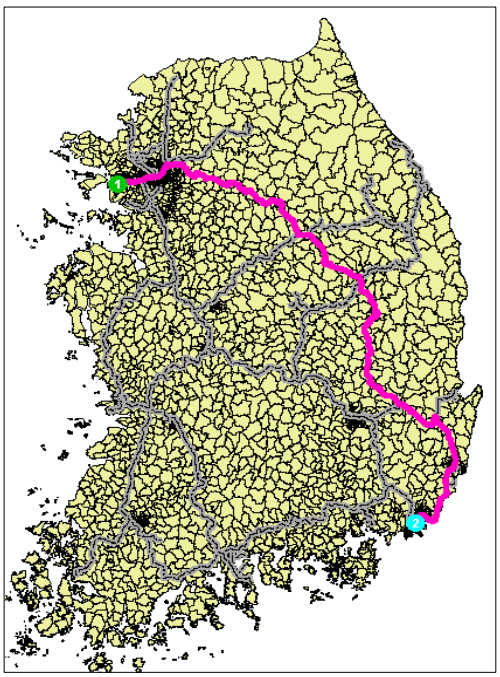
contents	B/C	etc
to improve lines to straight lines	0.16	
to construct fences and watching equipment	1.60	
to expand advanced security equipments	0.61	
to improve lines (Rail weightization and heavy rail)	0.38	
to improve structures (tunnel and bridge)	1.41	



<Figure 12> analysis of minimum risk route through the revision step 1~4

5~7단계의 보정단계는 아래와 같이 철도 위험물 최적수송경로 도출 표준화 방안에 따라 위험도 저감 대안을 실시한 후 기존의 북영천-영주 구간의 위험도가 저감되었다.

이때 경로의 직선화를 통해 시간적으로 1시간 59분(여객수송 차량 기준), 거리는 101.3km가 단축되어 위험물 수송 물류비를 절약할 수 있는 최적 수송 노선이 도출되었다.



<Figure 13> analysis of Optimum transportation route through the revision step 5~7

6. 결론 및 향후과제

6.1 결 론

기존의 철도 안전 연구는 단순히 철도 사고 감소를 위한 대안 측면에서 접근해왔지만 본 연구에서는 이러한 방식에서 탈피하여 GIS를 기반으로 철도 위험물 최적수송경로 도출의 표준화 방안을 마련하였다. 철도사고의 위험도를 반영하는 다양한 변수 중 발생 빈도가 극히 적어서 링크별 상대적 위험도 산정이 왜곡될 수 있는 변수들을 제외하여 인명사고가 링크별 상대적 사고 위험도를 대변한다는 가정 하에 위험도 산정 변수로 활용하였다. 그 결과 공중사상사고와 건널목 사상사고의 빈도가 높아 이를 예방하기 위한 대안들을 중심으로 선택하였다. 비록 완벽한 자료를 이용한 것은 아니지만, 적용결과 대안별 사고감소 편익에 대해서 경제성을 비교 분석함으로써 개선 사업 시 우선순위를 알아볼 수 있는 가능성을 파악할 수 있다.

그 결과 제시한 대안 중 가장 경제성이 높은 대안은 '선로울타리 및 감시설비 구축'으로 B/C비가 1.60으로 나타나, 철도 위험물 수송에서의 위험도 감소를 위한 최적 대안으로 선정되었다. 이러한 대안 시행 후 위험도를 분석하고 최적 수송경로를 보정하면, 기존의 우회하는 경로에서 O-D간의 직선화 를 통해 시간 및 거리의 감소를 가져와 전반적인 물류비의 절감을 가져올 수 있었다.

6.2 향후과제

본 연구에는 철도 위험물 수송 시 위험도에 기반한 최적수송경로 도출방안을 마련하였다. 경로 도출을 위해 위험물 수송 7단계를 활용함에 있어, Arcview S/W를 통해 초기 도출한 수송경로와 링크별 위험도 감소 대안을 적용한 후의 수송경로를 비교·분석함으로써 프로그램상 발생하기 쉬운 현실과의 오차를 최대한 줄이도록 보정단계를 거치도록 하였다. 본 연구에서 위험도 도출을 위한 변수로 활용한 사고 및 장애 자료를 활용하였으며, 충돌, 탈선, 화재 등의 사고도 변수로써 활용이 가능하며, 이는 추후 연구에서 다시 한번 고찰하도록 하겠다. 특히 본 과제에서 선택되어진 위험도 저감 대안을 시행함에 있어서 국가 수준의 위험도 관리를 위한 ALARP 범위가 설정되지 않아 정책결정에 혼선을 가져오고 있다. ALARP 이론은 영국철도에서 반영되어 많은 수행실적과 검증을 거친 방법으로 경제적 이득이라는 정량적 가치기준을 사용함으로써, 안전성 활동의 합리성에는 긍정적인 효과를 주는 것이 자명하다. 따라서 현재 영국 등에서 시행하고 있는 국가 수준의 ALARP 범위 개발을 위한 제도화가 시급하며, 이를 통해 철도 위험물 안전수송을 위한 최적수송경로 도출 표준화에 활용할 수 있을 것이다.

7. 참 고 문 헌

[1] Manish Verma, Vedat Verter, "Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins", Computers & operations research(2007)

[2] Hobeika, A. G. and Kim, Sigon "Databases and Needs for Risk Assessment of Hazardous Materials Shipments by Truck, Transportation of Hazardous Materials", (1993) : 153.

[3] Kim, Sigon, "Development of Risk Assessment Decision Support System for Hazardous Materials Movement, Virginia Tech:", (1990)

[4] 국토해양부, 보도자료(2009)

[5] Kim, sigon and Ahn, S. "GIS based Hazardous Materials Transportation Management System: A case Study for Ulsan City", Journal of transportation research society of Korea. (1999)

[6] US Dot, Highway Routing of Hazardous Materials, Guidelines for Applying Criteria.

[7] Cadland, "Working with the Arcview Spatial Analyst", (2003)

[8] 조성훈, 서선덕, 권경숙, "건널목 개선사업 효과의 계량적 평가 방법의 적용", 한국철도학회, (2004)

[9] 김영호, "로스앤젤레스 알라미다코리도 사업의 편익·비용분석2", (2002), KINX10110317

[10] 신덕호, 이재호, 이강미, 황종규, 정의진, 왕종배, 박영수, "열차제어시스템의 안전입증에 관한 연구, 한국철도학회논문집(2006) 제9권 제4호, 한국철도학회

[11] 건설교통부, "철도안전종합계획", (2006)

[12] 건설교통부, "교통안전연차보고서", (2007)

[13] 건설교통부, "교통안전시행계획", (2006)

저 자 소 개

팽 정 광

한양대학교에서 공학사, 미국 아이오와대학(University of Iowa)에서 공학석사를 취득하였다. 서울산업대학교 철도경영정책학과에서 박사과정을 수료하였고, 교통안전공단 기획조정본부장과 검사운영본부장을 역임하였다. 현재 한국철도대학에서 초빙교수로 있으며, 철도정책 및 철도안전 등 철도분야에 많은 활동을 하고 있다.

주소: 서울시 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 구도서관 216호 철도경영정책연구소

김 시 곤

부산대학교에서 학사, 미국 버지니아공대(Virginia Tech.)에서 석사와 공학박사를 취득하였으며, 한국교통연구원(KOTI)에서 철도연구실장을 역임하였다. 남서울대학교 산업환경시스템공학부에서 부교수로 재직하였고, 현재는 서울산업대학교 철도경영정책학과의 주임교수로 재직 중이다. 관심분야는 철도안전, 교통수요예측, 철도정보시스템 등이다.

주소: 서울시 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 구도서관 216호 철도경영정책연구소

강 승 필

서울대학교에서 교육학사, 미국 사우스캐롤라이나대학(University of South Carolina)에서 경제학석사 및 경제학박사를 취득하였다. 한국 교통개발연구원에서 선임연구원과 교통계획실장을 역임하였다. 미국 일리노이대 객원교수를 거쳐 현재 서울대학교 건설환경공학부 교수 및 대중교통포럼 회장으로서 교통계획과 물류경제 부문에서 많은 활동을 하고 있다.

주소: 서울시 관악구 관악로 599 서울대학교 공과대학 35동 511-A호

박 민 규

동국대학교에서 학사 및 공학석사 학위를 취득하였고, 현재 서울산업대학교 철도경영정책학과에서 박사과정을 수료하고, 서울산업대학교와 김천과학대학에서 강사로 활동 중이다. 현재 국가 R&D 사업인 연계환승과제와 위험물 물류표준화 과제를 수행중이고, 관심분야는 철도안전, 철도물류, Human Error 등이다.

주소: 서울시 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 구도서관 216호 철도경영정책연구소