

위험비용 요소를 통한 위험물 운송 사고의 경제적 영향 고찰

A study of economic impact of HAZMAT incident by its risk costs

양 윤 희 이 치 근

(서울대학교 석사과정) (University of Tronto 교수)

정 연 정 권 오 현 고 승 영

(서울대학교 박사과정) (서울대학교 석사과정) (서울대학교 교수)

key words : HAZMAT transportation, HAZMAT incidence, Risk cost

목 차

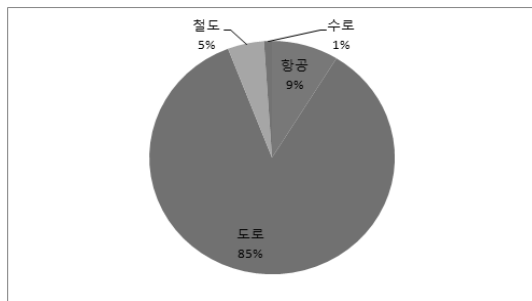
- I. 서론
- II. 관련연구의 고찰
- III. 위험 비용(risk cost)의 측정
 - 1. 최적경로모형 개발
 - 2. 위험비용의 요소
- IV. 결론 및 향후 과제

I. 서론

위험물 운송 사고는 모든 교통 관련 사고의 작은 부분을 차지하고 있으나, 그 결과는 사회적으로 큰 이슈가 될 만큼 막대함으로 운송업체, 정부기관, 보험회사 등의 관심을 주목시키고 있다. 또한 첨단 정보통신 인프라와 유비쿼터스 정보 서비스를 도시공간에 융합하여 도시생활의 편의를 증대시키는 U-CITY (유비쿼터스 시티 : Ubiquitous City)부문에서도 위험물 차량의 관리는 중요한 주제로 다루어지고 있다.

위험물 운송 사고와 관련된 위험을 감소시키는 방법으로는 차량의 유지보수 강화, 운전자의 자질 향상, 보관 시설의 안전 강화, operations research (OR) 를 통한 최적경로계획 마련이 등이 있다.

미교통성 (US Department of Transportation, US DOT)은 인명피해, 재산, 환경에 유해한 영향을 끼칠 수 있는 물질과 재료들을 위험물로 규정하고 있다. 수단에 따른 위험물의 운송은 부문은 도로 운송, 철도 운송, 수로 운송, 항공 운송, 파이프라인 운송으로 분류 될 수 있다. 2009년 미국에서 발생한 위험물 운송 사고는 총 14,405건이며, 도로에서의 사고가 12,359건으로 전체사고의 약 85%를 차지하고 있다.



<그림 1> 2009년 수단별 사고율, US DOT.

수단별 사고 원인으로, 먼저 항공의 경우는 운송 준비 미흡과 인적과오(Human error)로 인한 사고가 가장 많았으며, 도로의 경우 인적과오, 철도의 경우는 장치와 구성요소의 헛거워짐으로 인한 사고가 가장 많았다. 사고 피해액은 약 \$44.33 million이며, 인명피해는 경상 134명, 중상 19명, 사망 4명으로 집계되었다.

Mode of Transportation/ Cause	Incidents
Air	1,274
Improper preparation	189
Human error	162
Dropped	111
(total)	36.3%
High way	12,359
Human error	1,719
Dropped	1,592
Loose closure, component or device	1,434
(total)	38.4%
Rail	692
Loose closure, component or device	201
Defective component or device	80
Deterioration of aging	62
(total)	49.6%

<표 1> Hazmat summary by mode of transportation/cause, 2009.

위험물 운송 사고는 다양한 집단의 이해와 연관되어 있다. 교통부 또는 지역 정부가 위험도, 연료소비, 운송시간 등의 변수를 최소화하는 최적운송경로를 디자인함에 있어서 다양한 우선순위와 시각이 동존하는 이유가 여기에 있다.

위험물 운송에 대한 공공의 민감도 문제는 공공의 위험도 인식뿐만이 아닌, 형평성의 문제와도 관련이 있다. 위험물 운

송을 통해 혜택을 받는 사람들은 일반적으로 위험물 관련 공장시설이나, 운송지의 근거리에 거주한다. 그러나 위험물이 운송되는 도로 주변에 거주하는 사람들은 위험물 운송으로 인한 혜택의 유무에 관계없이 위험에 노출되어 있다. 이러한 혜택과 책임의 불일치가 위험물 수송에 대한 공공의 반대이유가 된다.

본 논문에서는 위험물 수송에서의 위험(risk)과 비용(cost)을 최소화하는 모델을 소개하고, 모델에서 사용된 비용화 된 위험의 변수를 경제적 비용의 관점에서 고찰함으로써 앞서 언급한 위험도 인식의 개선과 형평성 문제의 이해를 도모할 수 있는 방안을 마련하도록 한다.

II. 관련연구의 고찰

1. 국외 사례 고찰

1) **A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions** (Konstantinos G. Zografos , Konstantinos N. Androutsopoulos, 2008)

Bi-objective routing and scheduling의 관점에서 운송시간과 위험도를 이용한 최적경로 의사결정시스템을 제안하였다. 의사결정시스템은 위험물 사고 발생시 대안적 루트를 제공하며, 사고에 신속히 대처하기 위한 응급서비스 위치를 구체화하고, 영향권으로부터의 대피로를 결정한다.

논문의 동일 저자는 2004년, 위험물 수송문제에 휴리스틱 알고리즘(heuristic algorithm)을 제안하여 single/bi-objective vehicle routing problem에 적용한 바 있다.

2) **A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials** (Manish Verma, 2009)

비용과 위험의 bi-objective 모델을 제시하였다. 비용은 철도 산업의 특성에 기반하여 예측되었으며, 위험은 철도 사고의 동적 분석을 반영하여 예측되었다. \$4,120,000를 추가 지출함으로 위험물에 노출되는 2.6만명의 인구를 감소시킬 수 있다는 비용과 인구의 trade-off의 관계를 보여주고 있다.

3) **Comparative Risk Assessment of Hazmat and Non-Hazmat Truck Shipments** (Mark Abkowitz, 2000)

위험물과 비위험물의 트럭운송과 관련한 비교위험도를 평가하였다. 위험도 평가 방법론으로 첫째, 위험물을 유사한 사고영향에 기반한 카테고리 분류하였으며, 둘째, 위험물 카테고리별 사고당 경제적 영향을 산출하였다. 셋째로 위험물과 비위험물의 평균 위험비용을 비교분석하였다.

III. 위험 비용(risk cost)의 측정

1. 최적경로모형 개발

위험물 운송의 위험과 비용을 최소화하는 모형을 Integer Problem으로 나타냈으며, 목적식과 제약식은 다음과 같다.

$$\text{Min Risk} = \sum_t \sum_i l_i \cdot s_i \cdot \lambda_{it} \cdot V_{it}$$

$$\text{Min Cost} = \sum_i \{ \sum_j (t_{ij} \cdot x_{ij}) + s_i \cdot y_i \}$$

s.t

$$(1) \sum_i x_{ik} - \sum_j x_{kj} = \begin{cases} -1 & \text{if node } k = s \\ 0 & \text{otherwise} \\ 1 & \text{if node } k = d \end{cases}$$

$$(2) a_i + s_i + t_{ij} \leq a_j + (1 - x_{ij})M \quad \forall i, j \quad (M \text{은 큰 수})$$

$$(3) \sum_t t V_{it} = a_i \quad \forall i$$

$$(4) \sum_t V_{it} = \sum_j x_{ij} \quad \forall i$$

$$(5) 0 \leq a_i \leq T \cdot y_i \quad \forall i$$

$$(6) x_{ij} = 0, 1, \quad V_{it} = 0, 1$$

Notation

i, j, k : node (s 는 출발지, d 는 도착지)

t : 시각

l_i : node i 에서의 loss

s_i : node i 에서의 시간

λ_{it} : 시각 t 일 때, node i 에서의 사고율

V_{it} : t 시각에 node i 에 방문했으면 1, 그렇지 않으면 0

t_{ij} : arc(i, j)의 통행시간

x_{ij} : arc(i, j)를 이용하면 1, 그렇지 않으면 0

y_i : node i 를 이용하면 1, 그렇지 않으면 0

a_i : node i 에 도착한 시각

본 모형에서 위험물의 경로는 node와 arc로 구성되는데, node에서의 위험도는 혼잡시간대(rush hour)와 같은 시각에 따라 변화하고, arc에서의 위험도는 시각에 독립적이다. 제약식 (1)은 모델에서의 위험물 운송에는 한 대의 차량이 사용됨을 의미한다. 제약식 (2)는 차량이 node i 에서 node j 까지 이동할 때, node j 에 도착한 시각은 node i 와 arc(i, j)에서의 통행시간을 합친 것과 적어도 같아야 함을 의미한다. 제약식 (5)는 Time Horizon을 의미한다.

여기서 사용된 l_i 즉, node i 에서의 loss는 모형의 결과값을 도출하기 위해 비용화 되어야 한다. 이 비용화 작업을 위해 특정 가중치가 목적식 Min Risk에 부과되어야 할 것이다.

우리가 알고자 하는 위험비용(risk cost)의 측정은 바로 이와 같은 맥락에서 이해될 수 있다.

2. 위험 비용의 요소

위험물 사고로 인한 피해비용을 측정하기 위해서는 다양한 변수들이 고려되어야 한다. 변수들은 다음과 같이 구분될 수 있다. (Abkowitz et al., 2001; FMCSA¹⁾, 2001)

- 상해 또는 사망(Injuries and fatalities)
- 정화비용(Cleanup costs)
- 재산피해(Property damage)
- 대피(Evacuation)
- 생산물 손실(Product loss)
- 교통사고정체(Traffic incidence delay)
- 환경적 피해(Environmental damage)

각각의 변수들은 총 영향 비용의 비교를 위해 동일한 단위로 환산되어야 한다. 이는 위험물 사고의 위험 비용을 논의함에 있어 기본적인 요소가 될 것이다.

1) 상해 또는 사망

인간의 생명과 안전의 가치를 돈으로 환산하는 작업은 쉽지 않으나, 보험료와 정부의 정책 등을 통해 간접적인 측정이 가능하다. 위험물사고에서 사상자의 가치 측정은 다양한 시점이 존재한다(FMCSA, 2001). 예를 들어, 사상자의 가치는 사회적 수입과, 경제적 생산성 손실의 관점에서 이해될 수 있다. 미국도로안전교통국 (NHTSA, National Highway Transportation Safety Administration)은 사상자의 가치 비용을 직/간접적으로 구분하여 분석하였다. 직접적 비용은 사고 초기 치료비용, 재활비용과 같은 장기적인 치료비용, 보험 관리비용, 법적비용, 직장비용 등이다. 간접적 비용은 일시적 또는 영구적 생활 중지로 인한 직장과 가정에서의 생산성 손실이다. 1996년을 기준으로 사망시 비용가치는 대략 \$913,000, 중상 비용가치는 약 \$780,000으로 분석되었다.

2003년 국가안전보장회의(TNSC, National Safety Council)는 삶의 안전성을 높이고자 하는 인간의 효용을 더불어 고려하였다. 분석 결과에 따르면 사고로 인해 발생하는 중상과 사망의 회피 비용은 각각 \$181,000과 \$3,610,000으로 나타났다. US DOT에서 조사한 지불의사 비용은, 병원 치료가 필요한 상해의 경우 평균 \$400,000, 사망의 경우 \$2,800,000을 지불할 의사가 있는 것으로 조사되었다(FMCSA, 2001).

2) 정화비용 (Cleanup costs)

정화비용은 노출된 위험물의 확산방지비용과 정화비용을 포함한다(Abkowitz et al.,2001; FMCSA, 2001). 이는 위험물이 노출된 지역과 범위, 위험물의 종류에 따라 편차가 크게 나타난다. 미교통성의 위험물 정보시스템(HazardousMaterials

Information System, HMIS)과 캐나다 보건부의 작업장 유해물질 정보시스템(Work place Hazardous Materials Information System, WHMIS)은 정화비용을 분석하였다. 1990-1999년의 정화비용은 사고당 평균 \$24,000이며, 운송중 위험물 노출의 정화비용은 \$1300, 선하역시 노출된 위험물의 제거비용은 \$260으로 나타났다(HMIS database).

3) 재산피해

재산피해는 공적, 사적 재산 피해뿐만이 아닌, 사고와 연관된 다른 차량의 피해도 포함한다. HMIS의 1990-1999년 데이터에 따르면 가연성 물질 운송 사고의 평균 재산 피해는 \$16,041로 운송 사고의 평균 재산 피해액 \$274과 비교하여 상당히 높았다. 가연성 가스류에 의한 사고의 경우 \$3147, 부식성 물질의 경우 \$3104로 나타났다(FMCSA, 2001).

4) 대피

대피와 관련된 비용에서는 사업의 일시적 중지에 따른 임금 손실과 같은 다양한 변수들이 고려된다. 미국 교통연구원 (TRB, Transportation Research Board)이 1993년에 발표한 자료에 따르면 대피에 따른 비용 가치는 개인당 약 \$1000으로 나타났다. 이는 미국연방철도국(FRA, Federal Railroad Administration)에서 철도사고의 대피 가치 비용 측정에 사용되었다.

5) 생산물 손실

생산물 손실은 위험물이 유출되는 동안의 위험물의 양적/질적 손실을 의미한다. HMIS의 1990-1999년 데이터에 따르면, 가연성 액체 운송 사고시 위험물 유출 관련 생산물 손실의 평균비용은 사고당 \$3208이다. 또한 가연성 가스류 사고의 경우 평균 \$1140, 부식성 재료의 경우는 평균 \$4910의 생산물 손실로 나타났다.

6) 교통사고 정체

위험물 유출은 일반적으로 교통사고에 대한 응급 반응을 수반한다. 만약 교통량과 사고 상황 (차량 도착률, 도로용량 감소, 사고기간 등)이 알려지면 결정적 모델(deterministic model)이 사고 정체를 측정하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, Morales(1989)는 결정적 대기행렬 모델을, Wirasinghe (1978) and Alp(1995)은 충격과 이론에 기반한 모델을 사용하였다. 그러나, 결정적 모델은 사고 기간이 알려지지 않은 실시간의 상황에서는 부적합하다. 이러한 상황에서 정체는 추계 특성(stochastic characteristics)을 반영하는 랜덤변수에 의해 최적 모델화된다.

Grenzeback et al., (1990)은 사고정체의 시간당 비용을 트럭은 약 \$20, 기타 차량은 약 \$10로 측정하였다. 이는 운전자의 시간 가치와 연료 소비 비용을 포함한다.

7) 환경적 피해

환경적 피해 비용은 위험물 유출 정화 후 남은 위험물의

1) 미국연방화물자동차안전국(Federal Motor Carrier Safety Administration)

환경에 대한 피해 비용이며, 생태학적 측면의 농업 생산물 손실과 같은 경제적 손실의 관점에서 측정될 수 있다. (FMCSA, 2001).

IV. 결론 및 향후 연구과제

이처럼 위험물 사고의 피해는 다양한 비용과 연관되어 있으나, 현재 국내 위험물 사고 피해 분석에서는 인명피해(명 단위)와 재산피해(원 단위)의 분석에만 대다수가 그치고 있다. 사고 피해에 대한 정확한 분석을 위해서는 첫 번째, 준비비용으로 작용할 인명피해의 원단위 환산이 필요하다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 쉽지 않은 작업이나, 회피비용에 대한 지불의사를 통해 간접적인 측정이 가능 할 것이다. 두 번째, 사고로 인한 기회비용, 생산성 손실과 같은 잠재적 비용의 측면도 함께 고려해야 할 것이다. 예를 들어, 교통사고 정체와 환경적 피해 같은 비용들은 직접적인 비용과는 거리가 멀다. 그러나 이를 경제적 비용의 관점에서 종합적으로 고려할 때, 위험물 사고 피해에 대한 인식의 범위를 넓힐 수 있을 것이다.

본 논문의 향후 연구과제는 최적경로모형의 목적식 Min Risk의 변수 node i 에서의 loss, 즉 비용화 된 위험을 국내의 실제적인 예에서 산정하는 작업이 필요할 것이다. 더불어 그를 이용하여 위험물 운송의 위험과 비용을 최소화하는 최적 경로를 설계 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Manish Verma(2009), "A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials", Transportation Research Part D 14 (2009) 300 - 308.
2. Erhan Erkut, Stevanus A. Tjandra, and Vedat Verter(2007), "Hazardous Materials Transportation", C. Barnhart and G. Laporte (Eds.), Handbook in OR & MS, Vol. 14, chapter9.
3. Konstantinos G. Zografos , Konstantinos N. Androutsopoulos(2008), "A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions", Transportation Research Part C 16 (2008) 684 - 703.
4. Konstantinos G. Zografos , Konstantinos N. Androutsopoulos(2004), "A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems", European Journal of Operational Research 152 (2004) 507 - 519.
5. Erhan Erkut, Osman Alp(2007), "Integrated Routing and Scheduling of Hazmat Trucks with Stops En Route", Transportation Science Vol. 41, No. 1, February 2007, pp. 107 - 122.
6. Sibel Alumur, BaharY. Kara(2007), "A new model for the hazardous waste location-routing problem", Computers

& Operations Research 34 (2007) 1406 - 1423.

7. Mark Abkowitz(2000), "Comparative Risk Assessment of Hazmat and Non-Hazmat Truck Shipments", Annual Meeting of the Transportation Research Board and for publication in Transportation Research Record.
8. US DOT (2009). Hazmat summary by mode/cause: Calendar year 2009. The Office of Hazardous Materials Safety, US Department of Transportation, Washington, DC. Available at <http://hazmat.dot.gov/>.
9. FMCSA(2001). Comparative risks of hazardous materials and non-hazardousmaterials truck shipment accidents/incidents. Federal Motor Carrier Safety Administration, Washington, DC.