

■ 論 文 ■

위험물 수송을 위한 위험도 및 최적경로산정

-수도권 사례를 중심으로-

Estimation of Risk and Optimal Route to Transport Hazardous Materials

-Application to Metropolitan Area-

조 용 성

(아주대학교 교통공학과 대학원)

오 세 창

(아주대학교 환경·도시공학부 조교수)

목 차

- | | |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 이론적 배경</p> <p> 1. 위험물의 개요</p> <p> 2. 기존 모형에 대한 고찰</p> <p>III. 모형 개발</p> <p> 1. 위험도 분석 모형</p> <p> 2. 최적경로 모형 개발</p> | <p>IV. 모형적용 및 결과분석</p> <p> 1. 교통망 데이터의 생성</p> <p> 2. 모형 적용</p> <p> 3. 결과 분석</p> <p>V. 결론 및 향후연구</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

요 약

위험물차량사고는 일반차량의 교통사고시 발생하는 인명피해, 재산피해, 교통지체 외에 부가적으로 환경적 영향에 의한 엄청난 인명 및 재산손실을 유발시킬 수 있다. 따라서 이러한 위험물차량사고를 예방하고 피해를 최소로 줄이기 위해서는 위험물수송경로의 신중하고 체계적인 결정이 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구는 위험물차량의 수송경로를 결정할 때 고려해야 할 여러 가지의 기준 및 목표에 따라 위험물수송경로를 설정하는 모형을 제시함으로써 위험물수송에 수반되는 위험을 최소화하면서 위험물차량의 통행시간, 거리, 비용 등을 최적화하여 위험물수송의 안전 및 운영효율성을 향상시키고자 한다.

먼저, 위험물 수송경로의 기준지표로 사용될 위험도를 나타내기 위해 사고율과 피해가능규모를 구하도록 사고건수, 링크 주변노출인구, 링크상의 노출인구, 밀도 등을 변수로 하는 모형식을 제안하고, 두 번째로 위험물 수송을 위한 최적경로를 산출하기 위해 위험도와 통행시간을 목적함수로 하는 다목적계획모형을 제안하였고 기존의 최적경로 알고리즘을 적용하여 최적경로를 산출하였다. 마지막으로 실제 수도권지역을 대상으로 본 연구에서 제안한 모형을 적용하고 현재 일반적으로 사용되는 최단경로와 비교·분석하였다.

모형적용결과, 링크주변인구만을 고려하는 기존 모형에 비해 링크상의 인구를 함께 고려함으로써 좀더 실제적으로 교통상황을 충분히 반영한 피해규모를 산정하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 위험도와 통행시간에 0.5의 비중을 주는 다목적모형이 기존의 위험도모형에 비해 충분한 안전성을 확보하면서 최소 4%, 최대 12%의 통행시간 개선의 효과가 있음을 나타냈다.

I. 서론

위험물차량사고는 일반차량의 교통사고시 발생하는 인명피해, 재산피해, 교통지체 외에 부가적으로 환경적 영향에 의한 엄청난 인명 및 재산손실을 유발시킬 수 있다. 우리 나라에서는 다행스럽게도 도로상에서 위험물차량에 관련된 중대 사고나 큰 재난은 없었지만 일단 사고가 발생할 경우 막대한 피해를 야기할 수 있는 잠재력을 갖고 있다. 따라서 이러한 위험물차량사고를 예방하고 피해를 최소로 줄이기 위해서는 위험물수송경로의 신중하고 체계적인 결정이 필수적이라 할 수 있다.

외국의 경우는 위험물의 방출이 인간 및 자연에 미치는 영향에 대한 환경적 인식이 성장하면서 위험물차량관리에 대한 관심이 대두되었다. 이로 인해 위험물 수송시 응급처리에 관한 연구, 위험물수송에 따른 위험도평가에 관한 연구, 위험물수송시 공공의 노출을 최소화하는 방안에 관한 연구, 위험물 수송시 고려해야 할 여러 조건에 관한 연구, 위험물수송경로설정 등에 관한 연구 등이 진행되고 있다.

현재 우리 나라의 위험물수송관련 연구는 거의 없는 상태이지만, 앞으로는 산업발달에 따른 위험물수송량의 증가와 환경의식의 변화에 따라 위험물사용 및 처리시설정보수집 및 관리, 위험물차량에 대한 정보수집 및 관리, 위험물수송계획수립, 위험물사고처리 등에 관한 연구가 필요할 것이다. 따라서 미래지향적인 국가ITS사업에 있어서 위험물의 특성 및 안전과 운영효율을 고려한 위험물차량의 최적경로선정모형의 개발은 반드시 필요한 것이라 할 수 있다.

본 연구는 위험물차량의 운송경로를 결정할 때 고려해야 할 여러 가지의 기준 및 목표에 따라 위험물수송경로를 설정하는 모형을 제시함으로써 위험물수송에 수반되는 위험을 최소화하면서 위험물차량의 통행시간, 거리, 비용 등을 최적화하여 위험물수송의 안전 및 운영효율성을 향상시키는데 목적이 있다.

따라서, 본 연구에서는 위험물 수송량이 많고, 자료수집이 용이할 뿐만 아니라 본 모형의 적용이 가장 필요하다고 판단되는 경기도와 서울을 포함한 수도권지역을 대상으로 상대적인 위험도 평가를 통해 위험도가 낮은 경로나 보다 안전한 경로를 선택하는 모형 대신에 위험도와 통행시간을 함께 고려하는 모형을 연구하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 위험물의 개요

1) 위험물 수송에 대한 규제

위험물 운반차량의 노선을 지정 또는 금지하는 절차는 위험물 운반과 관련하여 도로 및 사회적 특성을 평가하고 도출하여 사회전체의 안전을 제고하는 관점에서 특정노선을 우선적으로 이용할 수 있도록 하기 위해서 수립된다. 따라서 법·제도적인 여건과 사회적인 목적에 따라 위험물 운송노선을 결정하는 영향요소나 판단기준이 수립되고 운송노선이 결정되어야 한다.

그러나, 현행 국내법을 살펴보면 위험물 노선선정에 있어서 법적인 규제사항이 위험물질을 취급하는 관련기관에 따라 위험물의 정의, 분류 및 취급방법에 차이가 있으며 위험물 운반에 대해서는 통합적으로 관리되지 않고 개별 법률에 의해 각각 규제되고 있다. 운송노선에 관한 규제는 서울시를 비롯한 대도시의 중심지 통행을 금지하는 규제 외에는 특별한 사항이 없는 것으로 조사되었다.

2) 위험물 수송의 영향요인

위험물 운송노선에 선정에 관한 규제 외에도 일반적인 도로 기하구조, 도로구조물, 교통규제사항, 도로 주변 현황 등이 운송노선 선정의 영향요인이 될 수 있다. 미국 도로국(FHWA, 1994)에서는 위험물 운송차량의 지정노선(designated routes) 또는 금지노선(restricted routes)의 수립, 유지, 강화를 위한 적용, 수행하는 방법에 대한 지침서에서 다음과 같이 위험도를 포함하여 고려해야 할 항목 13가지를 제시하고 있다. (Michel Nicolet-Monnier, 1996)

위험물 차량 노선선정의 기준을 적용하기 위한 고려항목	
• 인구밀도	• 또 다른 위험요소와 노출정도
• 도로의 형태	• 지형조건 고려
• 위험물의 양과 형태	• 노선의 연속성
• 긴급상황 대처능력	• 대안노선
• 전문가들의 의견(자문결과)	• 상업적 영향
• 수송시의 지체	• 혼잡과 사고기록
• 기후조건	

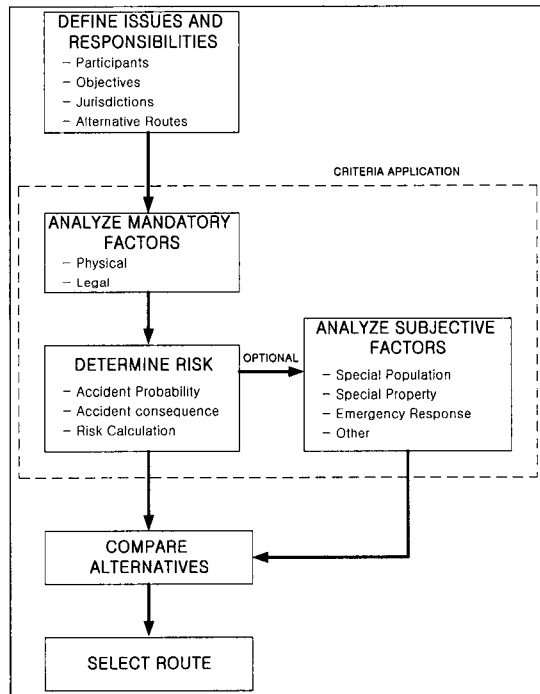
실제로 우리 나라에 적절한 노선선정 영향요인을

결정하기 위해서는 현행 규제사항, 교통사고 영향, 누출시 피해정도, 일반시민들의 위험도 인식 등에 대해서 보다 광범위한 검토 및 분석이 필요할 것이다.

2. 기존 모형에 대한 고찰

1) 미국의 FHWA 모형

FHWA의 최적경로 산정방법은 위험물 최적경로를 결정하는 방법 중에서 가장 널리 알려진 방법으로 <그림 1>과 같은 과정을 따른다.



<그림 1> FHWA의 최적경로 산정방법

<그림 1>에서 점선으로 되어 있는 부분이 주요 적용분야로서 크게 3단계로 나눌 수 있다. 먼저, 두 가지 형태의 필수요소에 의해 대안경로를 평가하는 단계로 물리적 요소인 중량이 제한된 교량이나 높이가 제한된 터널과 같은 시설이 있는 경로와 법·규제 등에 의해 위험물 차량의 통행이 금지된 지역을 제외하게 된다.

두 번째 단계는 FHWA의 최적경로 산정방법의 가장 핵심이 되는 단계로 Urbanek 모형을 사용하여 위험도를 평가하는 단계이다. 이 단계는 사고확률산정, 사고의 가능결과 추정, 위험도계산의 3단계로 나

누어지는데 각각은 다음과 같은 방법으로 구해진다.

(1) 사고율 산정

$$P_i = AR_i \times L_i \times FRAC \quad (1)$$

여기서,

P_i : 도로구간 i의 위험물 사고 확률

AR_i : 도로구간 i의 모든 차량형태에 대한 차량-마일(vehicle-mile)당 사고율

L_i : 도로구간 i의 길이

$FRAC$: 위험물 방출을 포함하는 사고의 비율(FRACTION)

(2) 사고로 발생 가능한 결과 추정

Urbanek 모형에서는 위험물방출사고로 인한 결과를 인적피해와 재산피해의 두 가지 형태로 분류하였다. 이 모형에서 인적피해는 위험물 방출에 노출 가능한 인구로 가정하고 영향권역내의 거주인구와 특별인구(학교, 병원 등의 시설의 이용인구), 도로의 운전자수 등을 기초로 인구조사지도(census maps)를 사용하여 추정하였다. 재산피해는 인적피해와는 달리 주어진 조건하에서 각 도로구간의 영향권역내가 아닌 인접한 시설에 대한 재산적 가치로 가정하고 토지이용을 저밀도, 중밀도, 고밀도 주거와 상업, 공업지역으로 구분하여 기본가치를 구한 후 토지이용지도를 이용하여 해당 도로에 인접한 시설의 재산적 가치를 추정하였다. 이렇게 추정된 가치와 해당 도로구조에 의한 도로가치를 합하여 재산피해로 추정한다.

(3) 위험도 산정

$$R_i = P_i \times EX_i / L_i \quad (2)$$

여기서,

R_i : 도로구간 i의 위험도

EX_i : 도로구간 i에서 위험물에 노출된 인구 또는 재산

세 번째 단계는 양적으로 계산하기는 쉽지 않지만 위험물 방출사고로 인해 영향을 받을 수 있는 응급반

응시간 등과 같은 주요 요소들에 대해 고려하여 대안 경로를 설정한다.

FHWA의 최적경로 산정방법은 위와 같은 3단계에 의해 설정된 대안경로에 대해 위험도와 주관적 요소의 정성적 평가에 따라 최적경로를 선택하게 된다 (OH Sei-Chang, 1988).

2) 캐나다의 밴쿠버(Vancouver) 모형

이 모형도 FHWA의 최적경로 산정모형과 기본적인 개념은 같다. 따라서 사고율과 사고로 발생 가능한 결과를 이용하여 위험도를 산정하고 그에 따라 최적경로를 산정한다.

(1) 사고율 산정

$$P_i = \frac{\text{Number of Accidents}_i}{\text{vehicle}_i \times \text{length}_i} \times \text{length}_i \quad (3)$$

여기서,

- P_i : 도로구간 i의 위험물 사고 확률
- $\text{Number of Accidents}_i$: 도로구간 i의 사고전수
- vehicle_i : 단위시간동안의 실제 교통량
- length_i : 도로구간 i의 길이

(2) 사고로 발생 가능한 결과 추정

$$C_{ijk} = V_{ijk} \times \frac{\pi R_j^2}{2 L_i R_j} \times H_{jk} \quad (4)$$

여기서,

- C_{ijk} : 위험물질을 포함한 사고의 실제 영향 결과
- V_{ijk} : 도로구간 I상에 위험물 j에 의해 수송 가능한 자원 k의 양
- R_j : 위험물질 j의 방출에 영향을 받을 권역의 반경 (기본 단위 방출당)
- H_{jk} : 최근의 위험물 생산율
- $i j k$: 각각 도로구간, 위험물질, 자원(resources)

(3) 위험도 산정

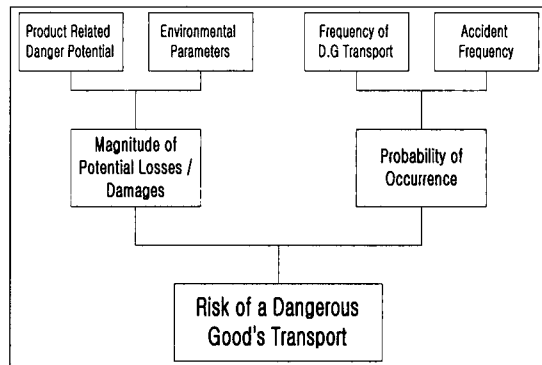
$$\text{Total Risk}_k = \sum_i (\sum_j (P_i C_{ij} \text{traffic}_{ij})) \quad (5)$$

여기서,

- Total Risk_k : 구간 i의 위험도
- traffic_{ij} : 연간 각 도로구간을 따라 수송되는 각 위험물의 양 (traffic volume)

본 모형의 위험도는 각 자원(resources)별로 해당 도로구간의 연간 위험도의 형태로 구해진다.

3) 스위스의 TDG 위험도 평가 방법(TDG-Risk Assessment Methodology)



<그림 2> 스위스의 TDG 위험도 평가 방법

<그림 2>는 스위스의 TDG 위험도 평가 방법을 나타내는 것으로 맨 위의 4개의 상자는 위험도 평가시 고려해야할 4가지 주된 요소를 나타내고 있다. 첫 번째 요소는 위험물수송과 관련된 파라미터(물리적-화학적 특성, 독성, 에너지 산출량 등)와 수송량이고 두 번째 요소는 환경적 파라미터로 토양, 물, 공기에 대한 위험가능성을 나타낸다. 세 번째 요소는 도로종류, 교통밀도, 지형 등에 따른 도로구간의 사고전수를 나타내고 네 번째 요소는 선택된 도로/철도/수로구간의 위험물수송의 빈도를 나타낸다.

앞부분의 두 요소는 가능한 손실의 크기를 설명하는 것으로 식(6)에 의해 구해지고 뒷부분의 두 요소는 위험물 사고의 발생확률을 추정하기 위한 것으로 식(7)에 의해 구해진다. 위험도는 이 두 요소의 곱합에 의해 산출된다.

(1) 위험 가능성

$$\sum P = P_H + P_A + P_S \quad (6)$$

여기서,

- P_H : 공기와 관련된 위험 가능성(인간과 동물 각각에 대하여)
- P_A : 물과 관련된 위험 가능성
- P_S : 토양과 관련된 위험 가능성 (각각의 식물에 대하여)

(2) 사고율 추정

$$Accident\ rate = \frac{U_i 10^6}{DTV_i L_i t} \quad (7)$$

여기서,

- U_i : 도로구간 i의 사고건수
- DTV_i : 거리(kilometer)당 도로구간 i의 일 평균 교통량
- L_i : 도로구간 i의 길이(km)
- t : 하루 중 관찰 기간

4) 기타 다목적 모형을 이용한 최적경로산정에 관한 학술연구

본 절에서는 위험물 수송의 최적경로를 산정하는 기법에 다목적 모형을 이용한 최근의 연구에 대해 설명하고자 한다. 기존의 위험도만을 가지고 위험물 수송의 최적경로를 산정하던 방법에서 최근에는 다목적 기법을 이용하여 여러 가지 기준을 동시에 고려하는 방법들이 소개되고 있다. 먼저, 1992년에 Abkowitz et al.은 기존의 연구와는 달리 위험물 경로 분석을 위한 5가지의 기준을 제시하고 평가하였다. 그가 제시한 기준을 보면 다음과 같다.

- ① 수송거리의 최소화 (minimizing shipping distance)
- ② 통행시간의 최소화 (minimizing travel time)
- ③ 사고로 인한 방출확률의 최소화 (minimizing release-causing accident)
- ④ 노출인구의 최소화 (minimizing population exposure)
- ⑤ 사고가능성과 이로 인한 노출인구의 최소화 (minimizing the product of accident likelihood and population of these)

여기서 기준 ①, ②는 경제적 비용을 최소화하는

목적으로 ③, ④, ⑤는 안전성을 최대화하기 위한 목적으로 설정되었다.

그의 평가결과를 보면 여러 가지 목적을 동시에 고려하여 평가해 본 결과, 위험도와 통행시간을 고려한 다목적 모형을 적용하는 것이 현실 적용에 가장 타당한 결과를 나타내는 것으로 평가되었다.

또한, 1997년 George F. List et al.은 그의 연구에서 위험물 경로 분석을 위해 다음과 같은 4가지 기준을 제시하였다.

- ① 운영비용 (operating cost)
- ② 사고율 (accident rate)
- ③ 노출인구 (population exposure)
- ④ 노출지역내의 학교의 수 (number of schools in exposure area)

위와 마찬가지로, 기준 ①은 경제적 비용을 최소화하는 목적으로 ②, ③, ④는 안전성을 최대화하기 위한 목적으로 설정되었다.

위 연구에서는 운영비용을 포함하였는데 여기서 운영비용은 통행시간을 기준으로 산출하였기 때문에 통행시간이 하나의 목적으로 사용되었음을 알 수 있다.

III. 모형 개발

1. 위험도 분석 모형

1) 위험도 산정

본 절에서는 앞에서 논의한 위험도의 영향요인과 산정방법을 토대로 현재 여건에서 바람직한 노선선정을 위한 위험도 분석 방법을 제안하고자 한다. 하지만, 현재 상황에서 위험도를 산정하기 위해서 필요한 위험물질에 대한 사고의 영향권 및 피해정도 등의 자료를 수집하거나 위험도 평가와 밀접한 관계가 있는 자료, 특히 사고에 따른 시설물이나 환경적 영향을 도출하기는 현실적으로 어려운 실정이다.

따라서, 해당 노선들을 대상으로 동일한 위험물과 노출사고 그리고 동일한 차량과 기후조건 등 노선자체를 제외한 제한조건들이 동일하다는 가정하에 해당 링크의 사고건수와 링크 일정거리내의 노출인구수를 곱한 값을 이용하여 위험도 지수를 산출하도록 한다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_i = f(P_{R_i} \times N_i) \quad (8)$$

여기서,

P_{R_i} : 링크의 사고율

N_i : 피해규모

$TVKT_{ij}$: 도로종류 i에서 도로구간 j의 구간별 트럭 통행량

L_i : 도로종류 i의 길이(km)

2) 사고율 산정

현재 우리 나라는 실정에서 위험물 방출확률뿐만 아니라 위험물 차량 사고자료 또는 이와 유사한 그 어떤 자료도 구할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 부득이하게 트럭의 사고율 또는 전체 사고율만을 이용하여 다음과 같이 사고율을 산정하기로 한다.

$$P_{R_i} = TAR_i \times L_i \quad (9)$$

$$TAR_i = \sum_j \frac{TA_{ij}}{TVKT_{ij}} \quad (10)$$

여기서,

P_{R_i} : 도로종류 i의 트럭사고에 따른 위험물 사고확률(빈도수)

TAR_i : 도로종류 i의 단위거리 당 트럭 사고율(accidents per veh-km)

TA_{ij} : 도로종류 i에서 도로구간 j의 트럭 관련 교통사고 건수

도로의 종류는 최상위등급의 고속도로와 주요 지역간을 연결하는 국도와 도내의 주요지역을 연결하는 지방도를 대상으로 검토하였다. 그 밖에도 도시고속도로, 시도, 군도 등으로 도로의 종류가 구분되어 있지만 본 연구에서는 통행량 및 교통사고 건수 등 기초자료가 비교적 양호한 고속국도, 국도, 지방도를 대상으로 사고율을 산정한다.

지난 2년간(1995~96) 고속국도, 국도, 지방도를 대상으로 사고율을 산정 한 결과 전체차량의 사고건수는 총 16760건의 사고가 발생하였으며, 이중 화물차량의 사고건수는 5989건으로 36%를 차지한 것으로 나타났다. 교통량 변화를 기준으로 설정한 구간별 연간교통량(AADT×365)과 해당구간의 길이를 곱한 연간교통량은 '95년에 28,957.8(백만대·km), '96년에는 31,424.6(백만대·km)로 나타났으며 이들에 의한 전체차량의 사고율과 화물차량의 사고율은 2년간 합계를 기준으로 각각 0.28, 0.27로 별다른 차이가 없는 것으로 조사되었다. 그러나, 도로종류별로는 전체차량이나 화물차량이나 모두 상당한 차이를 나타내는 것으로 조사되었다. 최상위 도로인 고속도로와 기타 도로간의 사고율은 약 4 배정도 차이가 나타나므로 하위도로인 국도 및 지방도가 고속도로에 비해 그만큼 위험한 것으로 분석된다.

<표 1> 도로형태별 사고율(1995년~1996년)

구 분		1995년		1996년		'95~'96	
		전체차량	화물차량	전체차량	화물차량	전체차량	화물차량
고속국도	연간교통량(백만대·km)	28,957.8	10,736.4	31,424.6	11,046.7	60,382.5	21,783.2
	사고건수	8538	2,883	8222	3,106	16760	5,989
	MVK사고율	0.29	0.27	0.26	0.28	0.28	0.27
일반국도	연간교통량(백만대·km)	63,058.8	11,235.6	67,462.1	20,086.1	130,520.9	31,321.7
	사고건수	68,181	21,326	73,687	21,176	141,868	42,502
	MVK사고율	1.08	1.90	1.09	1.05	1.09	1.36
지방도	연간교통량(백만대·km)	17,228	5,537.3	21,375.4	6,026.1	38,603.5	11,563.4
	사고건수	24,400	7,747	23,381	7,380	47,781	15,127
	MVK사고율	1.42	1.40	1.09	1.22	1.24	1.31

3) 피해 규모 산정

위험물 수송시 발생할 수 있는 사고에 의해 영향을 받을 수 있는 시설, 환경적, 경제적 피해규모를 정확히 산정한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 피해규모 산정을 위해 비교적 자료수집이 용이한 인구만을 고려하기로 한다.

일반적으로 위험도를 산정하기 위해 노출인구를 구할 경우에는 해당도로를 중심으로 일정거리내의 인구(도로주변의 노출인구)를 이용하였다. 하지만, 본 연구에서는 이와 같은 도로주변 노출인구에 도로상을 주행하는 차량 내에 있는 승객들을 포함하는 도로상의 노출인구를 포함하였다.

왜냐하면, 도로의 소통상태에 따라 도로상의 차내 승객들의 노출량도 급격하게 달라질 수가 있으며 도로의 종류나 지역에 따라서는 그 값의 크기가 도로주변의 거주인구의 노출량보다 커질 수도 있기 때문이다. 또한, 해당 노선에 위험물 운반차량이 통과할 때 얼마나 많은 인구가 위험물의 피해에 노출되어 있는지를 측정하는 것이 사고로 인한 피해정도를 보다 정확하게 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 정체 또는 유고로 인한 따른 잠재적인 피해정도의 변화를 보다 적절하게 판별할 수 있기 때문에 위험도 산정에 적합한 척도가 될 수 있기 때문이다.

(1) 도로변 노출인구

도로변 노출인구는 위험물차량을 따라 일정거리 내에 거주하는 거주인구수를 다음과 같이 식(11)에 의해 산출한다.

$$C_{1i} = \pi R^2 \times C_i \tag{11}$$

여기서,

- C_1 : 도로변 노출인구
- R : 해당 위험물의 위험권 반경
- C_i : 해당 위험권 반경내의 인구밀도

(2) 도로상 노출인구

도로상 노출인구는 도로상에서는 이동하는 위험물 차량을 따라 형성되는 위험반경 내를 통과하는 차량에 대해서 차량이동방향의 노출량과 반대방향의 노출량을 합산하여 다음과 같이 식(12), (13), (14)에 의해 산출한다.

또한, 위 식(11)에서 구한 도로 주변의 노출인구의 단위가 영향권역내의 거주 인구수(인)로 표현되므로, 두 가지 종류의 노출인구를 합치기 위해 도로상 노출인구는 차량의 평균 재차인원을 적용하여 동일한 단위로 환산할 수 있도록 하였다.

$$C_{2i} = C_{ci} + C_{oi} \tag{12}$$

$$C_{ci} = K_{ci} \times L_i \times VP \tag{13}$$

$$C_{oi} = K_{oi} \times L_i \times VP \tag{14}$$

여기서,

- C_2 : 도로상의 노출인구
- C_{ci}, C_{oi} : 각 방향별 노출량(인)
- K_{ci}, K_{oi} : 각 방향별 밀도(veh/km)
- L_i : 링크길이(km)
- VP : 평균재차인원

(3) 총 노출인구

본 연구에서는 도로변의 노출인구와 도로상의 노출인구가 가지는 위험도가 서로 다르다고 생각하여 각 노출인구를 단순히 합한 총 노출량 보다는 각 노출인구에 미치는 위험도의 영향을 고려한 변수를 사용하는 것이 적절하다고 판단하여 식(15)에 의해 총 노출인구를 산출하였다.

$$N_i = \alpha C_{1i} + \beta C_{2i} \tag{15}$$

여기서,

- N_i : 총 노출인구
- α, β : 도로주변 인구나 도로상의 인구에 대한 비율계수

2. 최적경로 모형 개발

일반적인 위험물 수송을 위한 최적경로는 상대적인 위험도 평가를 통해 위험도가 낮은 노선을 택하거나 보다 안전한 노선 체계를 구축하는 목적을 갖고 있다. 그러나 이러한 목적으로 상대적 위험도만을 가지고 위험물 수송노선을 결정할 경우에는 불필요하게

우회하는 노선이 선정되는 경우가 많이 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 위험물 수송을 위한 최적 경로로서 경제적 비용을 최소화 할 수 있는 목적과 안전성을 최대화 할 수 있는 목적 두 가지를 고려하는 다목적 계획 모형을 사용하여 기존의 방법에 의해 위험물 최적경로를 결정할 경우 불필요하게 발생하는 사회적 손실을 방지하고, 위험물 수송에 대한 안전성을 확보할 수 있는 최적경로 모형을 제시하고자 한다.

1) 다목적 계획 모형을 위한 목적 제시

앞서 2장에서 살펴본 기존 연구에서 제시한 여러 가지 기준들을 검토한 결과, 경제적 비용 최소화 측면에서 운영비용(통행시간과 거리를 기준으로 산출)과 통행거리는 통행시간과 같은 의미를 가지는 것으로 판단하여 경제적 비용을 최소화 할 수 있는 목적으로는 통행시간을 선택하였고, 안전성 최대화 측면에서는 사고로 인한 방출확률과 노출지역내의 학교의 수에 대한 자료의 수집이 어렵기 때문에 사고율과 노출인구를 고려한 위험도를 목적으로 설정하였다.

따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 2가지 기준에 의해 최적경로모형을 제시하고자 한다.

- ① 통행시간의 최소화 (minimizing travel time)
- ② 위험도의 최소화 (minimizing risk)

2) 최적경로 모형 개발

다목적 계획 모형의 적용방법은 크게 재량적 접근 방법, 최저목표 접근방법, 명시적 가중방법으로 나누어지는데, 본 연구에 적용하기 위해 이를 검토해 본 결과, 명시적 가중방법에 의한 모형적용이 가장 타당할 것으로 판단되었다. 명시적 가중방법은 과거의 공공기관의 의사결정기록 등의 관련자료로부터 계획 목적 사이의 상대적 비중을 추정하여 가중치를 부여하는 방법으로 본 연구에서도 각 기준목표에 어느 정도의 가중치를 부여할 것인지를 결정해야 하는 문제를 가지고 있지만, 이는 각 기준목표에 가중치를 변화시켜 감으로써 적정값을 찾을 수 있도록 한다. 따라서, 위험도와 통행시간을 최소화하기 위한 모형식은 식 (16)과 같다.

$$\text{최소화 : } TR_i = w_1 T_i + w_2 R_i \quad (16)$$

$$\text{제약조건 : } w_1 + w_2 = 1$$

$$T_i \geq 0$$

$$R_i \geq 0$$

여기서,

TR_i : 위험도와 통행시간을 최소화하기 위한 목적함수값

T_i : 도로구간 i 의 통행시간

R_i : 도로구간 i 의 위험도

w_1, w_2 : 각 기준목표에 대한 상대적 비중

본 연구에서는 가로망을 위상(topology)적 연결성과 사상의 속성(attribute)을 포함하는 GIS의 공간 자료의 형태로 구성하였다. 위험물 차량을 위한 가로망은 일반 가로망과 별다른 차이가 없다. 단지, 위험물 차량의 통행이 제한된 구역을 제외하고 터널과 교량같은 특정 시설이 위치한 링크에 가중치를 부여하는 정도의 고려만 하면 된다. 일반 가로망에 존재하는 회전제약이나 U-Turn, P-Turn과 같은 문제는 고려하지 않았다.

본 연구에서 노드에 대한 속성정보로 X, Y 좌표값만을 사용하였고 링크에 대한 속성정보에는 링크길이, 통행시간, 밀도, 사고율, 위험도 등을 포함하였다. 또한, 위험물 차량의 최적경로 산출을 위한 알고리즘은 TransCAD에 내장된 최단경로 알고리즘을 사용하였다.

IV. 모형적용 및 결과분석

본 연구에서는 특정지역의 위험도 및 최적경로선정에 대한 분석을 위하여 1995~96년을 기준으로 수도권 지역을 대상으로 선정하였고, 모형의 적용을 위해서 GIS tool인 TransCAD를 이용하여 대상자료를 구축하였다.

1. 교통망 데이터의 생성

1) 자료의 구성

〈그림 3〉은 모형적용을 위해 사용된 TransCAD의 작업환경으로 수도권 일대의 가로망과 노드속성, 링

크속성을 나타낸다. 가로망은 주요 도로인 간선도로와 보조간선도로만을 추출하였고, 1484개의 노드와 2078개의 링크로 구성되어 있다.

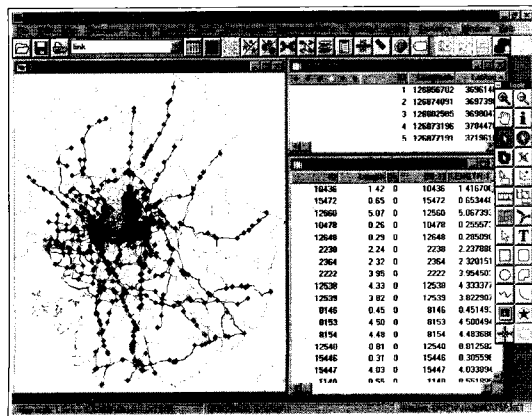
속성자료로는 존별 인구나 면적, 링크길이, 통행시간, 교통량, 사고율 등으로 구성되어 있다.

〈표 2〉 존 자료 구성

ID	면적	존 이름	구	시	인구
164	0.249110	장위1동	성북구	서울	497614
503	31.736330	의정부시			276255
519	117.693298	양주군			94553
531	177.806366	이천군			155276
- 중간 생략 -					
520	155.544495	남양주군			228931
496	2.375218	동구	동구	인천	100248
505	20.327877	부천시			779476
504	22.270237	안양시			590996
501	41.403194	수원시			755502

〈표 3〉 링크 자료 구성

ID	X 좌표값	Y 좌표값
469	127220242	37526397
1001	127277818	37846017
1004	127425004	37745845
1040	126640716	37469673
1044	126674145	37476514
- 중간생략 -		
1045	126677659	37470195
4018	127177036	37281725
4022	127264399	37444373
4025	127057802	37295588
4026	127123460	37425644



〈그림 3〉 모형적용을 위한 TransCAD 작업환경

2. 모형 적용

1) 대상지역에 대한 기본자료 수집

대상지역에 대한 토지이용, 주변거주인구, 기하구조, 선형, 교통량, 설계속도, 밀도 등 위험도 산정을 위한 자료와 도로종류, 도로폭, 차선수, 기하구조, 선형 등 기본적인 네트워크를 구성할 때 기준으로 활용할 수 있는 자료를 수집한다.

2) 위험물차량이 통행 가능한 기본 네트워크 구성

앞에서 수집한 도로종류, 도로폭, 차선수 등을 기준으로 위험물차량의 안전한 통행이 가능한 기본 네트워크를 구성한다. 따라서, 간선도로 및 보조간선도로의 기능을 갖는 도로와 시가지의 경우 4차선 이상의 도로를 대상으로 구성하고 여기서, 통행이 제한된 터널, 교량 같은 특정시설 과 통행이 제한된 지역(서울시 4대문)은 네트워크 구성에서 제외한다. 이 주어진 자료를 기반으로 제반 특성이 유사하게 교통량이나 도로형태 등에 따라 구간으로 나눈 후 각 구간별 수집자료를 정리한다.

3) 각 링크에 대해 위험도 산정

(1) 각 링크에 대해 사고율 산정

현재 우리 나라는 위험물 차량에 대한 사고조사거의 전무한 실정이기 때문에, 위험물 차량에 대한 사고율을 산정하는 것은 불가능하다. 따라서, 트럭의 사고율을 산정하는 것이 바람직하고, 부득이한 경우에는 전체차량의 사고율을 산정해야 한다. 여기서는 다음과 같이 본 연구에서 구한 도로형태별 사고율을 적용하였다.

(단위 : 사고건수/백만대)

구 분	고속국도	일반국도	지방도
전체차량 사고율	0.28	1.09	1.24
화물차량 사고율	0.27	1.36	1.31

$$\blacksquare \text{ 사고율} = P_R = \sum_i \frac{TA_{ij}}{TVKT_{ij}} \times L_i$$

〈표 4〉 노드 자료 구성

ID	링크길이	통행시간	밀도	노출인구	사고율	위험도	F0.5RISK
124	0.3132	0.0092	122.1782	716.3514	1.3100	116.0574	58.0333
151	0.6860	0.0123	63.3556	206.1197	0.2700	4.5368	2.2745
202	0.3390	0.0099	250.3509	327.3996	1.3100	49.0109	24.5104
305	0.1146	0.0034	216.7164	399.9136	1.3100	177.0110	88.5072
408	0.4307	0.0139	23.2900	324.6535	1.3100	34.7718	17.3928
- 중간 생략 -							
15503	0.3516	0.0113	180.8580	93.7095	1.3600	11.2624	5.6368
15504	0.5858	0.0171	217.9236	357.1244	1.3100	30.9411	15.4791
15507	0.7273	0.0213	9.0909	746.1298	1.3100	52.0629	26.0421
15509	2.3986	0.0386	48.5950	111.4458	0.2700	0.7795	0.4091
15510	0.1567	0.0025	44.6300	4.2109	0.2700	0.4510	0.2268

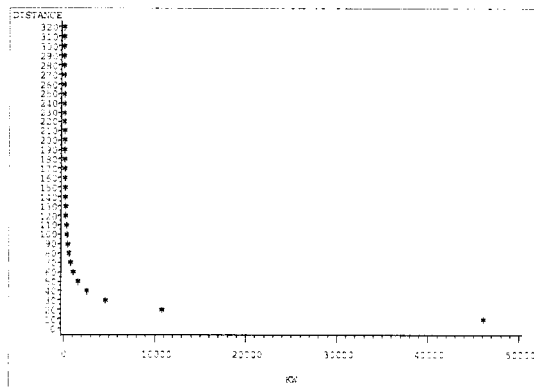
(2) 각 링크구간에 대해 피해규모 산정

앞에서도 설명했듯이 위험물 수송시 시설적, 환경적, 경제적 피해규모에 대한 정확한 산정이 어렵기 때문에, 자료수집이 용이한 인구만을 피해규모의 대상으로 하여 도로변 노출인구와 도로상 노출인구를 구한다.

또한, 〈표 5〉에서 보듯이 위험물의 종류에 따라 영향을 미치는 권역과 피해규모가 다르기 때문에 본 연구에서는 위험물 중 가장 대표적인 가스(LPG)차량을 대상으로 위험도를 산정하고자 한다. 따라서, 한국가스안전공사에서 탱크로리 사고로 인한 피해 영향을 평가한 보고서를 참조하여 도로상 노출인구와 도로변 노출인구의 피해정도 계수 α , β 를 다음과 같이 산정하였다.

거리와 대기투과율의 상관도는 0.90046이고, 거리와 복사열간의 상관도는 0.91989로 모두 90%이상의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 거리에 따라 위험물 차량의 사고에 대한 영향이 크게 다른 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 그래프에서 뚜렷한 변화가 나타나는 50M를 기준으로 도로상의 노출인구의 영역을 50M 이내로, 50M~200M(200M 이후에는 치명사가 발생하지 않기 때문) 사이를 도로변 노출인구의 영역으로 제한하여 그에 따른 치명사의 확률을 평균한 값을 계수로 사용하였다.



〈그림 4〉 거리와 복사열과의 관계

〈표 5〉 위험물질 그룹별 사고 발생시 평균영향거리

Class of Hazardous Material	Impact Area
Combustible Liquid	0.8km all directions
Flammable Liquid	0.8km all directions
Flammable Solids	0.8km all directions
Oxidizers	0.8km all directions
Non-Flammable Compressed Gas	Downwind 2.1 km wide * 3.2 km long
Flammable Compressed Gas	0.8km all directions
Poison/Toxic	Downwind 0.3 km wide * 0.5 km long
Explosives	0.8km all directions
Corrosive	Downwind 0.8 km long * 1.1 km wide

자료 : MICHEL, Quantitative Risk Assessment of Hazardous Materials Transport Systems

계산 결과, 50M이내의 평균 치명사 확률은 16.7, 50M~200M 사이의 평균 치명사 확률은 5.7로 나타났다. 이를 계수로 사용하기 위해 환산하면, α 값은 0.75, β 값은 0.25로 계산된다.

■ 총 노출도(Total Consequence)

$$= 0.25 C_1 + 0.75 C_2$$

(3) 위험도 산정

앞에서 구한 사고율과 총 노출도를 곱하여 위험도를 산정한다.

■ (Risk)_i = 사고율(Probability)_i × 총 노출도(Total Consequence)_i

4) 최적경로 결정

앞에서 구한 위험도와 통행시간을 최소화 할 수 있는 다목적 계획 모형을 이용하여 최적경로를 결정한다.

■ 최소화 : $TR_i = w_1 T_i + w_2 R_i$

본 연구에서는 위험물차량의 이동에 따른 최적경로를 선정하는 문제를 하나의 노드(출발지)에서 다른 하나의 노드(목적지)로의 최단경로를 찾는 문제와 하나의 노드를 출발하여 다른 여러 개의 노드를 거쳐 다시 출발지로 돌아오는 TSP(Traveling Salesman Problem)의 두 가지로 구분하여 TransCAD에 내제된 알고리즘을 적용하였다.

3. 결과 분석

본 연구에서는 수도권 지역을 대상으로 위험물 수송을

■ 총 노출도(Total Consequence) = $\alpha C_1 + \beta C_2$

총 노출량은 도로상의 노출인구와 도로변의 노출인구를 구하여 추정하는데, 도로상의 노출인구에 대한 위험도가 도로변의 노출인구의 노출도에 비해 상대적으로 크기 때문에 그에 대한 가중치를 부여하여 할 것으로 판단된다. 이 값은 거리, 폭발력, 치명사의 확률, 도로변 주거인구까지의 거리 등 여러 변수에 의

한 회귀식으로 표현될 수 있지만, 그에 대한 뚜렷한 조사자료가 전무한 상태이고, 각 지역마다 조건이 다르기 때문에 명확한 값을 추정하기에 어려움이 따른다.

위한 최적경로 모형을 적용하였다. 적용시 대상이 되는 출발지와 목적지는 임의로 가능한 많은 경우를 포함하도록 선정하였고, 알고리즘 수행시 기준목적별(통행시간, 위험도, 통행거리, 본 연구에서 제시한 모형 등)로 다른 기준의 값을 산출하도록 하여 비교평가가 쉽도록 하였다.

다음과 같이 총 6가지 경우에 대해 사례분석을 실시하였다.

- ① 사례 1 : 포천군에서 평택군까지
- ② 사례 2 : 고양군에서 서울시 송파구까지
- ③ 사례 3 : 김포군에서 이천군까지
- ④ 사례 4 : 포천군에서 평택군사이에 1지점 추가
- ⑤ 사례 5 : 김포군에서 이천군사이에 2지점 추가
- ⑥ 사례 6 : 남양주군에서 인천시 송구사이에 3지점 추가

사례 1~3은 최단경로문제를 구현하였고, 사례 4~6은 TSP문제를 구현하였다.

기존의 모형과의 차이점을 비교하기 위해, 먼저 위험도 산정을 위한 피해규모 산정시에 도로상의 인구를 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우에 대한 차이를 비교함으로써 기존의 위험도와 본 연구에서 제시하는 위험도와의 차이점을 비교하였다. 두 번째로 기존의 최적경로 산정 기준인 위험도를 이용한 최적경로와 본 연구에서 제시한 모형에 의해 산출된 최적경로를 비교하였다.

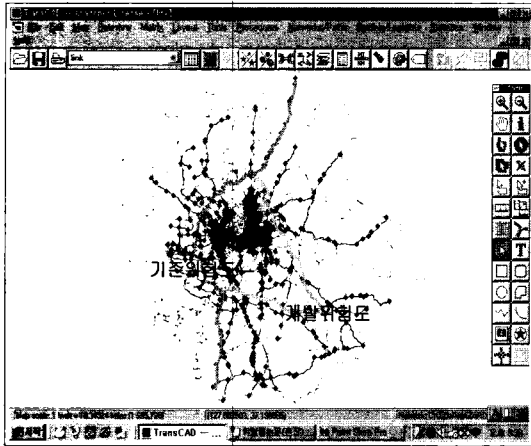
1) 위험도 결과 비교

도로상의 인구를 고려할 경우와 고려하지 않는 경우를 비교하기 위해 본 연구에서 제안하는 위험물 최적경로 산정방법을 사용하여 각각의 사례에 대해 적용하였고 그 결과는 아래 <표 6>과 <그림 5>에 나타난 것과 같다.

이와 같이, 도로상의 인구를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우를 비교해 본 결과 사례 별로 차이가 있지만 공통적으로 도로상의 인구를 고려한 경우가 위험도가 낮으면서 통행거리는 긴 최적경로를 산출하는 것을 알 수 있다.

〈표 6〉 피해규모산정방법의 차이에 따른 위험도 비교

		사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5	사례 6
위험도	도로상의 인구를 고려하지 않을 경우	113.19	216.86	74.59	568.35	1344.62	1587.35
	도로상의 인구를 고려할 경우	101.55	216.40	73.11	562.30	1333.34	1580.13



〈그림 5〉 피해규모산정의 차이에 따른 모형적용결과 비교 (사례 1의 경우)

특히, 〈그림 5〉에서 보듯이 사례1의 경우는 본 연구에서 제안한 도로상의 인구를 포함하여 위험도 산정하는 방법이 기존의 방법에 비해 크게 우회하는 최적경로를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

2) 최적경로 결과 비교

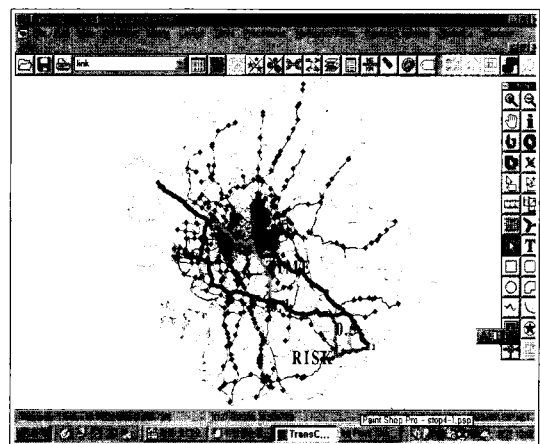
기존의 최적경로 산정방법과 본 연구에서 제시한 최적경로 산정방법에 의해 산출된 최적경로를 비교하기 위해 위험도에 대한 가중치를 0.9부터 0.1씩 감소시키면서 6개의 사례에 적용해 본 결과, 위험도의 비중이 감소할수록 위험도는 증가하고 통행시간은 감소하는 것으로 나타났다. 대표적으로 사례 3과 사례 4의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

〈표 7〉에 나타난 것처럼 사례 3의 경우에는 통행시간을 기준으로 최적경로를 산출하였을 경우에 통행시간은 3.564(시간), 위험도는 5684.1486(인)이고, 위험도를 기준으로 최적경로를 산출하였을 경우에는 통행시간은 4.6603(시간), 위험도는 73.1048(인)이다. 또한, 위험도에 대한 가중치가 0.9에서 0.3까지는 통행시간이 4.3353시간, 위험도가 73.2153(인)으로 나타났고, 0.2와 0.1일 경우에 통행시간은 4.2267(시간), 위험도는 74.5855(인)으로 나타났다.

〈표 7〉 모형적용결과 (사례 3의 경우)

VALUE IM PEDANCE	통행 거리	통행 시간	사고율	위험도	다목적 모형
통행거리	165.12	4.3542	150.80	3254.97	454.25
통행시간	174.63	3.5640	58.25	5684.14	791.24
위험도	198.26	4.6603	58.21	73.10	12.48
0.9	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.8	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.7	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.6	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.5	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.4	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.3	195.15	4.3353	61.03	73.21	12.33
0.2	185.62	4.2267	52.87	74.58	12.47
0.1	185.62	4.2267	52.87	74.58	12.47

〈그림 6〉은 사례 3의 모형적용결과를 나타낸 것인데, 통행시간을 기준으로 한 최적경로(TIME), 위험도를 기준으로 한 최적경로(RISK)와 위험도에 0.5, 0.1의 가중치를 주었을 경우의 최적경로를 보여주고 있다.



〈그림 6〉 모형적용결과 (사례 3의 경우)

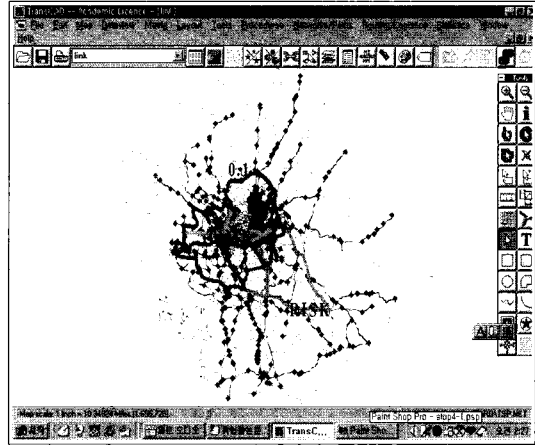
〈표 8〉에 나타난 것처럼 사례 6의 결과를 살펴보면 통행시간을 기준으로 최적경로를 산출하였을 경우에 통행시간은 2.3279(시간), 위험도는 13377.9775(인)이고, 위험도를 기준으로 최적경로를 산출하였을 경우에는 통행시간은 5.3568(시간), 위험도는 1580.1345 (인)이다.

위험도에 대한 가중치가 0.9에서 0.6까지는 통행시간이 5.3568시간, 위험도가 1580.1345(인)으로 기존 모형과 같은 결과를 나타냈고, 0.5일 경우에는 통행시간이 5.1771(시간), 위험도는 1580.4757(인)으로 나타났다. 또한, 위험도에 대한 가중치가 0.4와 0.3일 경우에는 통행시간이 5.0365(시간), 위험도가 1581.0021(인)이고, 0.2일 경우에는 통행시간이 4.5524시간, 위험도가 1586.2287(인), 0.1일 경우에는 통행시간이 4.1313(시간), 위험도는 1593.3714 (인)으로 위험도의 비중이 내려갈수록 큰 변화를 나타냈다.

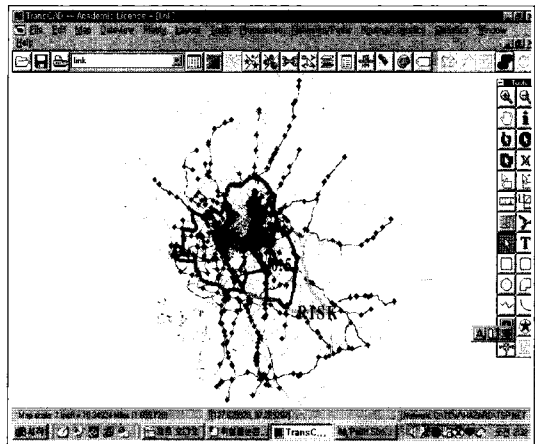
〈표 8〉 모형적용결과 (사례 6의 경우)

VALUE IM PEDANCE	통행 거리	통행 시간	사고율	위험도	다목적 모 형
통행거리	97.18	2.6365	214.655	14224.90	1977.00
통행시간	105.46	2.3279	149.485	13377.97	1859.21
위험도	223.09	5.3568	114.87	1580.13	222.14
0.9	223.09	5.3568	114.87	1580.13	222.14
0.8	223.09	5.3568	114.87	1580.13	222.14
0.7	223.09	5.3568	114.87	1580.13	222.14
0.6	223.09	5.3568	114.87	1580.13	222.14
0.5	216.50	5.1771	109.48	1580.47	222.09
0.4	201.58	5.0365	115.15	1581.00	222.10
0.3	201.58	5.0365	115.15	1581.00	222.10
0.2	182.77	4.5524	106.82	1586.22	222.58
0.1	172.94	4.1313	102.46	1593.37	223.36

〈그림 7〉과 〈그림 8〉은 사례 6의 모형적용결과를 나타낸 것인데, 〈그림 7〉은 통행시간을 기준으로 한 최적경로, 위험도를 기준으로 한 최적경로와 위험도에 0.1의 가중치를 주었을 경우의 최적경로를 보여주고 있다. 〈그림 8〉은 위험도를 기준으로 한 최적경로와 위험도에 0.5의 가중치를 주었을 경우를 기준으로 한 최적경로를 보여준다.



〈그림 7〉 모형적용결과 (사례 6의 경우)



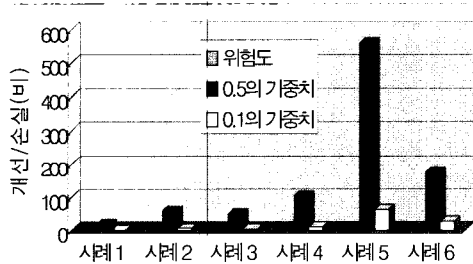
〈그림 8〉 모형적용결과 (사례 6의 경우)

본 모형에 가중치를 변화시키면서 6개의 사례에 적용해 본 결과, 사례 6을 제외한 대부분의 경우에 크게 3가지 경로로 구분되었다. 사례 1, 3, 4, 5는 출발지와 목적지가 먼 경우를 대상으로 하여 외곽부분에서는 하나의 노선 이외의 통행경로에 선택에 대한 대안이 적고, 사례 2는 출발지와 목적지가 가까운 경우지만, 중앙에 통행 제한된 구역을 포함하고 있기 때문에 역시 대안이 적을 수밖에 없다. 반면에 사례 6은 서울 중심지를 통과하고, 3개의 지점을 거쳐야 하는 경로를 산출하는 경우로, 다른 사례에 비해 대안경로가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 모형이 가중치의 변화에 민감하지 못한 것은 네트워크 구성상에서 위험물 차량이 통행 가능한 링크만을 대상으로 하였고, 출발지와 목적지간의 대안노선이 많지 않기 때문인 것으로 판단된다.

〈표 9〉 통행시간과 위험도의 상대적 비중(가중치)변화에 따른 모형적용결과 비교

	0.5			0.1		
	개선(%)	손실(%)	개선/손실	개선(%)	손실(%)	개선/손실
사례 1	7.88	0.45	17.5111	18.92	11.01	1.7183
사례 2	12.12	0.21	57.7143	41.00	7.62	5.3788
사례 3	7.47	0.15	49.8000	9.30	2.03	4.5946
사례 4	4.19	0.44	104.7500	9.65	0.90	10.7258
사례 5	5.60	0.01	560.0000	7.08	0.11	63.6904
사례 6	3.47	0.02	173.5000	22.87	0.84	27.3023

〈표 9〉에서 보는 바와 같이 모형식의 통행시간과 위험도에 0.5씩의 비중을 줄 경우가 통행시간에 0.9, 위험도에 0.1의 비중을 준 경우에 비해 모든 사례에서 위험도의 손실에 대한 시간적 이익효과의 비율이 약 10배정도 크게 나타났기 때문에, 본 모형에서는 통행시간과 위험도에 0.5의 비중을 주는 것이 가장 효율적인 경로를 산출하는 모형인 것으로 판단하였다.



〈그림 9〉 통행시간과 위험도의 상대적 비중(가중치)변화에 따른 모형적용결과 비교

본 연구에서 개발한 모형을 적용하였을 경우에 사례 3에서 통행시간은 4.3353(시간), 위험도는 73.2153 (인)으로 통행시간을 기준으로 했을 경우의 위험도보다 위험도는 7663.61%의 개선효과가 있고, 위험도를 기준으로 했을 경우의 통행시간보다 통행시간은 7.47%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 사례 6에서는 통행시간이 5.1771(시간), 위험도는 1580.4757 (인)으로 통행시간을 기준으로 했을 경우의 위험도보다 위험도는 746.45%의 개선효과가 있고, 위험도를 기준으로 했을 경우의 통행시간보다 통행시간은 3.47%의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 즉, 위험도와 통행시간에 0.5의 비중을 주는 모형이 기존의 위험도모형에 비해 충분한 안전성을 확보하면서 최소 4%, 최대 12%의 통행시간 개선의 효과가 있음을 나타냈다.

V. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 위험물 수송시 경제적, 안전적 측면 모두를 고려한 보다 효율적인 모형을 개발하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 위험도 분석에 중요한 요소인 피해가능규모를 산정 할 때에 도로주변의 인구만을 고려하지 않고, 도로상의 인구를 고려해 줌으로써 수시로 변하는 교통상황을 충분히 반영할 수 있도록 하였다. 또한, 도로상의 인구와 도로주변의 인구의 단순결합이 아닌각각에 가중치를 부여함으로써 좀더 정확한 피해규모를 산정하도록 하였다.

둘째, 기존의 연구에서 위험도만을 고려하여 위험물 수송시 불필요하게 우회하게 되었던 경로를 통행시간을 고려한 다목적모형을 제안함으로써 충분한 안전성을 확보하면서 좀더 빠른 경로를 통행하도록 하였다. 모형 구현 결과 위험도와 통행시간에 대한 가중치는 각각에 0.5의 비중을 주는 것이 가장 효율적인 경로를 산출하는 모형인 것으로 판단된다.

마지막으로, 위험도 분석 및 위험물 최적경로모형에 GIS기법을 사용함으로써 기존의 수리적 방법에 비해 시간과 비용의 절감뿐만 아니라 보다 효율적인 자료관리와 분석을 가능하게 하였다.

그러나 본 연구도 많은 한계점을 가지고 있는데, 본 연구에 통해 본 앞으로 필요한 향후 연구과제로는 먼저, 본 연구에서 인구만을 고려해서 피해가능규모를 산정했기 때문에, 상수도 보호지역과 같은 환경적 영향이나, 터널이나 교량과 같은 시설적인 영향에 대한 적절한 고려방법에 대한 연구가 필요하다.

둘째, 본 연구에서는 비교적 간단한 명시적 가중방법을 사용하여 다목적계획모형을 단일계획모형화하여 기존의 알고리즘에 적용하였지만, 모형식과 알고리즘을 동시에 고려하여 적절한 후보노선을 선정한 후 최적의 노선을 선택하는 좀더 효율적인 최적경로모형의 개발과 이를 통해 노선선정과 출발시간대 선정이 동시에 고려될 수 있는 알고리즘이 필요하다.

〈표 10〉 모형적용결과

		사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5	사례 6
통행시간	통행시간	4.2165	0.9755	3.5640	4.2387	3.9976	2.3279
	위험도	6.3372	4.6193	4.6603	6.2124	6.1264	5.3568
	모형	5.8378	4.1200	4.3353	5.9628	5.8015	5.1771
위험도	통행시간	14373.2698	4800.6163	5684.1486	13592.2617	11753.2546	13377.9775
	위험도	101.5494	216.4014	73.1048	562.2975	1333.3436	1580.1345
	모형	102.0022	216.8541	73.2153	562.5239	1333.4541	1580.4757
통행시간	개선(%)	7.88	12.12	7.47	4.19	5.60	3.47
	손실(%)	27.77	76.32	17.79	28.94	31.09	55.03
위험도	개선(%)	13991.13	2113.75	7663.61	2316.30	781.41	746.45
	손실(%)	0.45	0.21	0.15	0.04	0.001	0.02

셋째, 본 연구에서 AADT를 이용하여 해당도로의 평일 첨두시간 교통류율 또는, 평균교통류율과 같은 일반적인 밀도를 사용함으로써 통행패턴에 시간대별 교통량 분포를 정확하게 반영하지 못하였기 때문에 기존방법과의 뚜렷한 차이를 증명하는데 어려움이 있었다. 따라서, 시간대별 변화요인을 감안한 도로상의 밀도를 사용하여 적용할 경우 본 연구에서 제시한 위험도가 뚜렷한 차이를 나타낼 것으로 판단되므로 이를 실시간으로 이용할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

마지막으로 추후 ITS에 적용하기 위해 위험물 수송 중 유고로 인한 추가 위험도를 산정하고 우회도로와 위험도 비교를 통해 실시간으로 대안경로를 산정할 수 있는 모형의 개발이 필요하다.

참고문헌

- 김원길(1996), 도시간 ATIS적용을 위한 최단경로 알고리즘의 구현, 아주대학교 석사학위논문.
- 윤대식·윤성순(1995), 도시모형론 -분석기법과 적용-, 홍문사.
- 장용봉(1996), GIS를 이용한 위험도분석과 위험물질의 최적이동경로에 대한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 장원재(1998), 복합교통망에서의 최적경로산정모형개발, 아주대학교 석사학위논문.
- 최종욱(1997), ITS와 첨단정보기술, 도서출판 참말.
- 한국가스안전공사(1997), 탱크로리 운행중 사고 피해 영향평가.
- Oh, Sei-Chang(1988), "The Role of Track Condition in the routing of Hazardous Material Shipments by Rail," Master Thesis, Carnegie-Mellon University.
- George F. List와 3인(1991), "Modeling and Analysis for Hazardous Materials Transportation : Risk Analysis, and Facility Location," Transp. Sci., 25, 100~114.
- LINDA K. NOZICK와 2인(1997), Integrated Routing and Scheduling in Hazardous Materials Transportation, TRANSPORTATION SCIENCE Volume 31, Number 3.
- MICHEL NICOLET-MONNIER와 1인(1996), Quantitative Risk Assessment of Hazardous Materials Transport Systems, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA)(1994), Guidelines for Applying Criteria to Designate Routes for Transporting Hazardous Materials.
- William R. Rhyne(1994), Hazardous Materials Transportation Risk Analysis, Van Nostrand Reinhold.