위험도 기반 위험물질별 수송 안전 표준화 방안

| 김 시 곤 |
서울산업대학교
철도경영정책학과 교수

1. 머리말

지구상에 현존하는 위험물은 이미 수년 전에 10만 종류를 돌파하였다. 그리고 매년 수종에서 수십 종의 새로운 위험물이 생겨나고 있다. 국내외에서 인용되고 있는 자료를 분석해 보면 위험물 사고의 70% 이상이 수송 중 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 대량 수송이 이루어지는 선박 및 철도 수송의 경우 단 한 번의 사고로 인한 피해는 매우 심각하다. 이러한 위험물 사고는 대부분이 인명피해 또는 막대한 환경 및 재산 피해를 가져오는 대형사고로의 확대 가능성이 매우 높다. 이러한 상황을 감안한다면 위험물 수송사고 저감으로 피해감소 및 응급피해 복구 절감이 사회 · 경제적으로 막대한 효과를 가져다 줄 것은 자명한 사실이다.

본 기고문에서는 국내 위험물 수송에 있어서의 현황을 분석하고, GIS를 활용한 위험물 수송 표준화를 마련함으로써 효율적인 위험물 수송 안전관리 방안을 수립하고자 한다.

〈표 1〉 국내 위험물 관련 법령

부처	법령	내용
소방 방재청	위험물 안전관리법	인화성 또는 발화성 등의 성질을 가지는 것으로 대통령령이 정하는 물품을 말함
환경부	유해화학 물질 관리법	유독물, 관찰물질, 취급제한물질 및 취급 금지물질, 사고대비물질, 그 밖에 유해성 또는 위해성이 있거나 그러할 우려가 있는 화학물질을 말함
지식경제부	고압가스 안전관리법	상온(常溫)에서의 게이지 압력이 10kg 중/㎢ 이상이 되는 압축가스로서, 현재 그 압력이 10kg 중/㎠ 이상인 것, 또는 35℃의 온도에서 압력이 10kg중/㎠ 이상이 되는 압축가스를 말함
교육과학 기술부	원자력법	핵연료물질 사용 후 핵연료 · 방사성동위원소 및 원자핵분열생성물을 말함
경찰청	총포 · 도검 화약류 등 단속법	화약, 폭약, 화공품(화약 및 폭약을 써서 만든 공작물)으로 나누어 정의함

2. 위험물의 정의 및 분류체계 표준화 방안

가. 국내 위험물 정의 및 표준화 현황

일반적으로 위험물(HAZMAT)에 대한 정의는 위험물을 취급하는 정부 부처별로 그 특성과 기능에 맞도록 관련 법령에서 정의하고 있다. 하지만, 국내에서는 아직 위험물 수송에 국한한 별도의 분류체계는 정의되어 있지 않고 소방방재청의 '위험물 안전관리법' 등의 정의를 활용하고 있는 실정이다. 이에 반해 미국과 영국 등에서는 위험물 수송 분야에 별도의 정의 및 분류체계를 통해 효율적인 위험물 수송 관리가 이루어지고 있다. 이러한 흐름에 발맞추어 늦은 감이 있지만 현재 국회에서 '위험물 수송 관련 법안'이 입법 중인 것은 매우 다행스러운 일이라 할 수 있다.

나. 국제 위험물 정의 및 표준화 현황

국제적인 위험물의 표준화 방안의 일환으로 '화학물

질의 분류 및 표시 등에 관한 세계조화시스템(GHS)'에 의한 분류가 많이 활용되고 있다. 하지만 이는 화학물질에 국한되어 있어 방사선 물질 등은 포함되지 않는 문제점이 있다. 이러한 GHS 분류에서는 물리적 위험성에 따라 총 16가지 항목으로 유해/위험성에 따른 표지요소 및 분류기준을 제공하고 있다. 이에 반해 국내의 '위험물안전관리법'에서는 6종의 분류가 활용되고 있어우리의 위험물 수송의 분류체계는 그 세분화에 있어 미흡함을 알 수 있다. 특히 미국의 US Dot에서는 일반적 위험물 분류 외에 수송과 관련하여 14가지의 별도 분류 체계를 가지고 있고, 영국도 육상수송규칙에 따라 11가지로 분류하여 관리하고 있다.

다. 위험물 수송관점에서의 분류체계 표준화

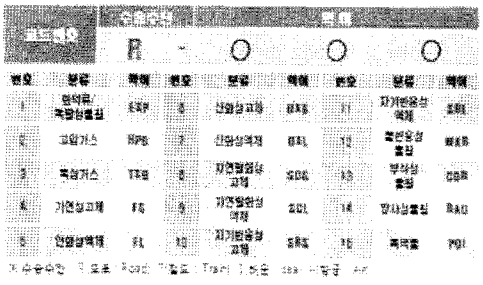
위험물은 국내뿐만 아니라 국제적인 관심사로 UN 및 운송수단 관련 국제기구를 중심으로 국제협약을 제정하거나 시행하고 있다. 그리고 인명, 재산 및 환경 보호를 위한 필수조건으로서 위험물의 안전수송 및 사고피해 최소화를 위한 국제사회 노력에 동참해야 한다. 따라서 국제 GHS 분류체계를 수용하고 유해화학 물질이 아닌 화약류, 가스류, 방사성물질, 독극물을 추가하고, 사고 발생 시 비슷한 형태를 보이는 것은 그룹핑하되 액체와 고체는 분리하여 총 15가지의 분류체계를 표준화하였다. 그리고 위험물 수송 코드를 수송수단별 위험물 분류 영문약어를 종합하여 3~4자리로 표기한 위험물 통합 수송코드 표준화 방안을 마련하였다.

3. 위험물 수송 위험도 정의

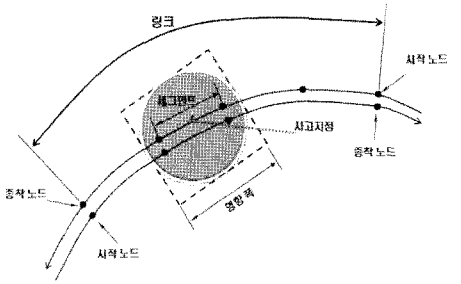
위험물 수송에 대한 위험도를 구하기 위해 3가지 분석모형을 검토하였다. 첫째는 단순수치지표법(Enumerative Indices)으로 위험물 사고발생을 야기할 수 있는 근원을 화학공장, 위험물보관장소 등으로 나누고, 사고발생시 피해의 규모를 인구밀집, 위험물수송수단, 위험물종류 등으로 구분하며 순위를 매김(Ranking)으로서 위험도를 계산하는 가장 단순한 방법이다. 둘째, 회귀분석법(Regression Models)은 일일평균교통량, 도로의 기하구조, 신호등개수, 도로의 종류 등을 독립변수로 하여 종속변수인 위험도를 계산하는 방법이다. 셋째 확률적 위험평가법(Probabilistic Risk Assessment Models)은 위험도 사고확률과 사고 발생 시 피해규모를 조건부 확률(Conditional Probability)의 개념을 적용시켜 위험도를 평가하는 방법이다.

가. 모형의 전제조건

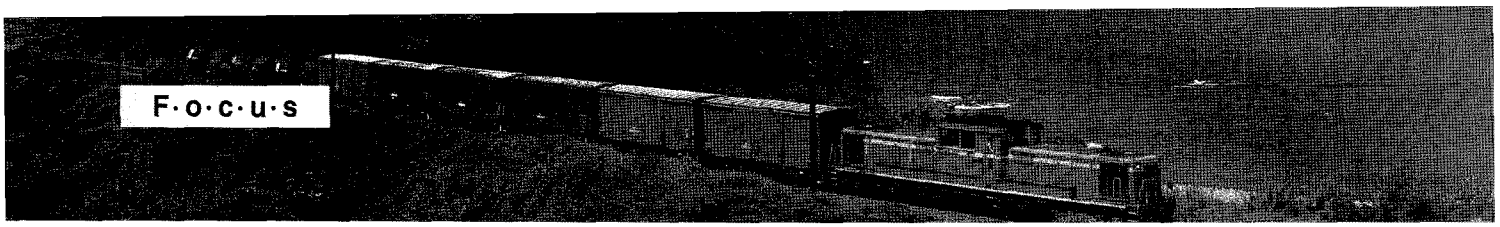
위험도 분석 모형 개발의 효율성을 위해서 몇 가지 전제 조건을 정의하였다. 일반적으로 위험물 수송 수단별 위험도 분석이란 도로 및 철도 등의 시설을 이용하여 위험물을 운반할 때 야기되는 위험도에 국한하며, 적재, 하역 시 발생하는 각종 위험물 사고는 포함하지 않는다. 또한 링크별 위험물 수송 수단이 수반하는 절대적 위험도의 규명은 어렵기 때문에 상대적 링크별 위험정도를 구분하는 상대적 위험도를 제시하였다. 또 피해규모의



〈그림 1〉 위험물 통합 수송 코드 표준안



〈그림 2〉 위험도 분석모형 개발을 위한 기본 용어



산정을 위한 전제조건으로 사고 발생 시 피해규모는 풍향, 지형에 따라 달라지나 일반적으로 위험물질이 미치는 영향폭을 감안한 원내 포함 인구, 건물 및 환경으로 대체하였으며 계산의 단순화를 위해 원면적 대신 피해영향폭을 제곱한 정사각형 면적으로 대체하였다.

나. 위험도 분석 모형

위험물 수송 시 예상되는 위험도는 크게 위험물 수송수단의 사고, 특히 위험물 방출을 수반하는 사고발생확률(Probability)에 비례하고, 동시에 사고발생 시점 및 지점에서의 피해가능규모(Consequence)에 비례하는 사실에 기초한다. 즉, 위험도는 단순히 사고발생확률에 피해가능규모를 곱한 것이다.

(1) 사고발생확률(P)

위험물 차량의 사고발생확률은 주행차량대수와 링크 길이에 영향을 받을 것이다. 우선, 단위 길이당 트럭사고발생률(Truck Accident Rate)을 구하고 사고발생 시 위험물 노출가능성을 감안한다면 사고발생확률은 아래와 같이 표현 될 수 있을 것이다.

$$P(R)_i = TAR_i \times P(R/A)_i \times L_i$$

- 여기서,

$P(R)_i$= 링크 i에서 위험물 수송차량이 야기하는 사고발생확률

TAR_i= 링크 i에서 트럭사고 발생률(accident veh/veh · km)

$P(R/A)_i$= 링크 i 에서 트럭사고시 위험물 방출 확률

A_i= 링크 i 의 길이(km)

(2) 피해노출규모(C)

위험물 수송사고로 인한 위험물 누출 시 피해노출규모는 사고발생시점과 장소마다 다를 수 있다. 예컨대 중심상업지구 등의 도심지역에서는 피해 가능한 인구 및 건물 등이 많이 노출되어 있고 산악지역에서는 인구 및 건물 등이 거의 노출되어 있지 않기 때문이다. 또한, 위험물 차량 사고 시 방출되는 위험물의 양에 따라 피해노출

〈표 2〉 피해노출규모 측정기준

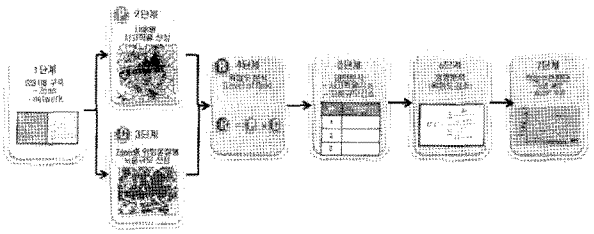
구분	피해대상
인구노출	-피해 가능한 인구규모 -주간에는 고용자 인구, 야간에는 주거지 인구
환경노출	-도로주변의 환경 피해 규모 -주요관심 환경과 일반환경으로 나누어 가중치를 부여하는 방안

규모가 달라질 것이다. 하지만 이러한 사실들을 모두 모형으로 나타내기가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 제안되는 모형은 상대적 위험도 평가 모형이기 때문에 피해가능 규모는 단지 위험물질별로 영향을 미칠 수 있는 범위 내에 속하는 즉, 피해 가능한 인명 및 물질의 노출량으로 정의하였다. 구체적으로, 본 연구에서는 인구노출량과 환경노출량을 피해노출 규모의 측정 기준으로 선택하였다.

4. 위험물질별 도로 O-D간 위험물 수송 표준화

위험물 수송 관리는 향후 SOC 건설, 비상대응 계획 등 '계획' 용으로 사용하는 것이며, 실제 운영기관에서 사용하며 실시간 조치를 위한 '운영' 용이 아니다. 특히 고속국도, 일반국도 및 철도를 포함하는 복합수송에 대한 표준화가 가능하도록 확장성을 갖출 수 있도록 하였고, 특히 이때의 표준화는 GIS에 기반 하도록 하여 시간과 인력의 절약 등의 효율성을 추구하였다.

이러한 관점에서 위험물 수송 관리를 위해 7단계 과정의 표준화 절차를 다음과 같이 구축하였다.



〈그림 3〉 위험물질별 도로 O-D간 위험물 수송관리 표준화 절차도

가. GIS DB 구축(1단계)

도로 네트워크는 교통개발연구원 국가교통DB센터에서 구축한 NGIS DB중 Level 4를 기준으로, 지역간 도로, 즉 고속도로와 국도에 국한하여 GIS 환경하의 도로 네트워크를 구축하였다.

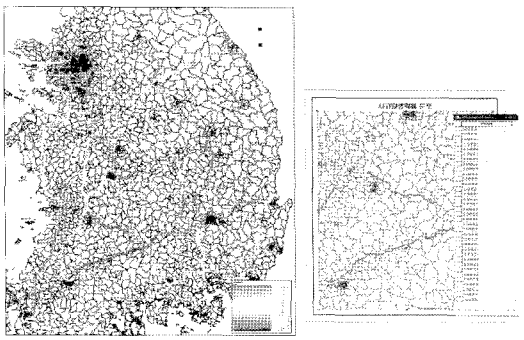
나. 링크별 사고발생확률(2단계)

위험물 수송 차량의 사고발생 확률은 주행차량대수와 Link의 길이에 영향을 받는다. 단위 길이 당 트럭사고 발생률(Truck Accident Rate)을 구하고 사고발생시 위험물 노출가능성을 감안한다면 사고발생확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

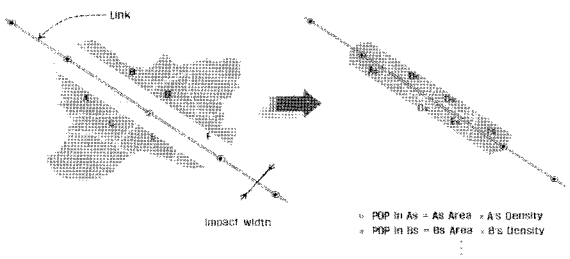
다. Zone별 위험물질별 노출규모 산정(3단계)

피해가능 규모를 측정하기 위해 인구노출과 환경노출 등 2가지 노출량을 측정 기준으로 선정하였다.

이때 일반적인 방법으로 피해노출 규모를 도출하는 것이 매우 어렵기 때문에, GIS 프로그램인 Arcview를 활용하였다. 이는 특정 구간을 기준으로 하는 구역(Zone)을 생성하여 이 구역 내에 존재하는 특징에 대해 알아볼 수가 있고, 해당 링크별로 인접지역(Zone of Proximity)을 생성 및 표출 하는 버퍼링 기법의 활용과 중첩 분석의 클립 기능은 버퍼된 면적 값을 기준으로 하여 그에 해당하는 만큼을 제외한 나머지부분을 잘라버리는 기능을 활용하여 위험물질별 노출규모를 측정하였다.



〈그림 4〉 링크별 사고확률



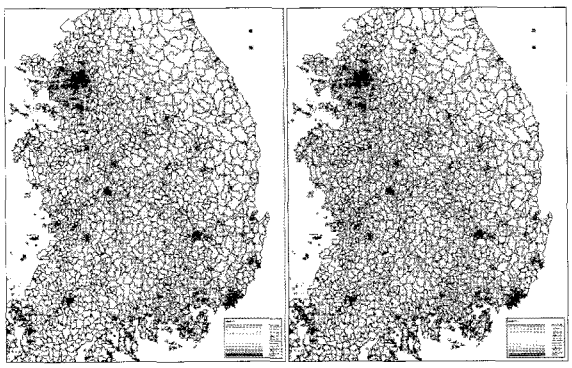
〈그림 5〉 버퍼링 및 중첩 분석

라. 위험도 분석(4단계)

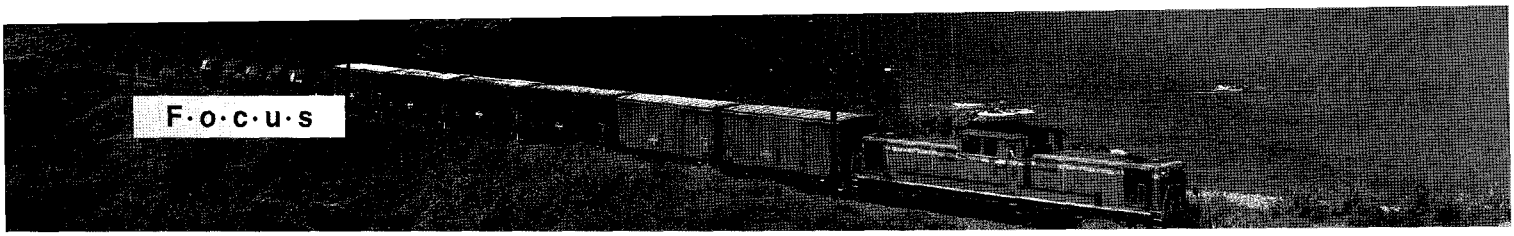
위험도(R)는 단순히 사고발생확률(P)에 피해가능규모(C)를 곱하는 것이다. 이 함수를 이용하여 Arcview에서 구현하여 인구노출 위험도 및 환경노출 위험도를 고속도로에서 표출한다. 인구 중심 위험도와 환경 중심의 위험도를 감안한 고속도로 최적경로분석 결과는 다음과 같이 각각 다른 형태를 보인다.

마. 대안분석(5단계)

일반적으로 위험도 저감을 위해서는 사고확률 가소를 위한 대안과 피해노출규모를 감소하기 위한 대안을 분석한다. 사고확률감소 대안은 안전카메라 설치, 미끄럼방지포장, 중앙분리대 설치, 곡선반경개선 등이 있으며, 피해규모감소 대안은 위험물 저수지 유입방지 설비와 화재 및 폭발 피해 방지설비를 대안으로 선정할 수 있다. 이중 사고확률감소대안의 편익은 다음과 같이 도출할 수 있다.



〈그림 6〉 도로 링크별 위험도



〈표 5〉 사고확률감소 대안의 편익산정

대안		시설물	사망자수 (등가사망적용)	감소율	편익 (천원)
사고 확률 감소	대안1	안전카메라	10명	45%	1,880,429
	대안2	미끄럼방지포장	10명	61%	2,549,025
	대안3	중앙분리대	10명	75%	3,134,048
	대안4	가드레일	10명	10%	417,873
	대안5	곡선반경개선	10명	90%	3,760,857

바. 영향분석(6단계)

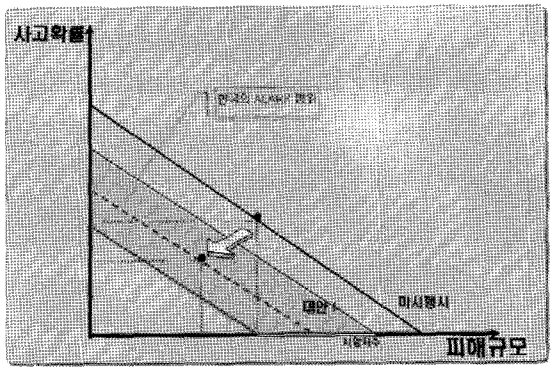
표준화의 1~4단계를 통해 도출되어진 상대적 인구위험도 구간인 31.5km와 환경 위험도 구간인 4km 구간에 설치되어질 대안별 비용을 분석하였고, 안전카메라는 km당 1대씩 설치하는 것으로 정의하였다. 일반적으로 편익은 건설 후 20년 간 계산하고 할인율은 5.5%를 적용하였다. 그 결과 사고확률감소를 위한 총 5개의 대안 중 '안전카메라'의 B/C비가 1.90으로 가장 높았고, 나머지 대안은 B/C비가 1에 미치지 못하는 것으로 분석되었다.

사. 적정 수준 판단(7단계)

ALARP(As Low As Reasonably Practicable)은 합리적 허용 수준이라 할 수 있으며, 일반적으로 사회적으로 합의된 가치를 의미한다. ALARP 수준은 낮으면 낮을수록 좋으며, 더욱 낮은 값을 가져야 그 사회의 안전 수준 및 의식이 높다고 할 수 있다. 하지만 현재 국가 수준의 ALARP 범위가 설정되지 않아 실제로 교통안전 사업을 시행하는데 어려움이 있으므로 이에 대한 전문가 및 국민들의 합의를 도출할 필요성이 있다.

〈표 6〉 사고확률감소 대안의 편익산정

대안		시설물	감소율 (%)	편익 (천원)	B/C 비
	대안1	안전카메라	45	1,880,429	1.90
	대안2	미끄럼방지포장	61	2,549,025	0.09
	대안3	중앙분리대	75	3,134,048	0.60
	대안4	가드레일	10	417,873	0.35
	대안5	곡선반경개선	90	3,760,857	0.04



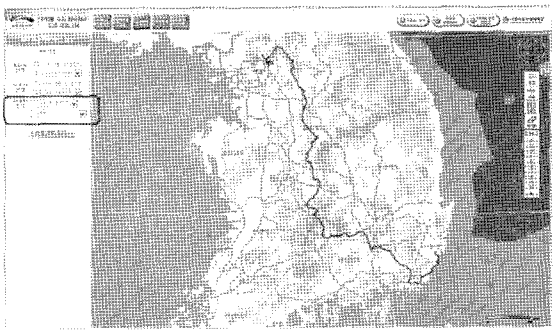
〈그림 7〉 ALARP 수준의 선정

5. 도로 위험물 최적수송경로 도출 프로그램 개발

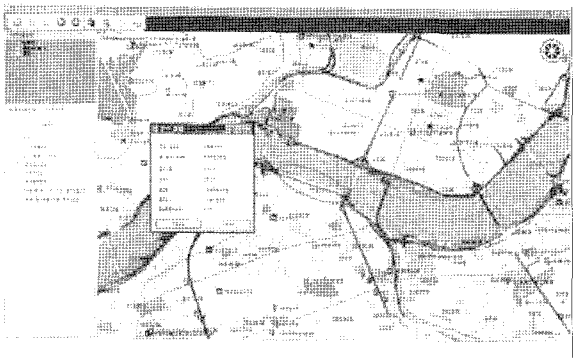
지금까지 개발한 위험물 수송관리 표준화 7단계를 활용하여 위험물 최적수송경로 도출 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 7단계 중 1~4단계까지의 과정을 Web을 통해 재현하는 것으로, 위험물질별로 O-D를 지정하면 위험도에 기반 하여 각 위험물질별 최적수송경로의 도출이 가능하다.

6. 도로 수송 위험물 안전관리의사결정지원시스템(DSS) 개발

도로 수송 위험물의 안전관리 정책을 위해 정책결정자



〈그림 8〉 위험물 도로 최적수송경로도출 프로그램



〈그림 10〉 위험물 안전관리의사결정지원시스템

및 관계자들에게 효율적인 최적 대안을 제시하기 위해 의사결정지원시스템(DSS)를 개발하였다. 해당 시스템(DSS)은 GIS 정보, 교통사고 데이터 등을 통해 위험도를 분석하고 위험도를 낮추기 위한 여러 대안들의 경제성 분석이 가능하며, 교통안전정책의 시행과 SOC 사업의 순위 선정 등을 위한 계획용으로 활용할 수 있다.

7. 맺음말

산업화 및 현대화 등으로 인해 앞으로 위험물의 사용은 더욱 증대될 것이다. 이에 따라 위험물의 수송 또한 증가할 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최우선적으로 위험물 수송 관련 법령의 재정을 통해 여러 부처간의 법과 관리체계를 일원화해야 한다. 그리고 이때 새롭게 재정되는 법령은 국제 기준과 부합하도록 해야 할 것이다.

지금까지의 위험물 수송 사고 예방 대책은 주로 사고 발생건수를 감소하기 위한 대책 위주였지만, 추후에는 실제 위험물질별 위험도에 기반 한 7단계 표준화를 통해 더욱 효율적인 수송안전관리 체계가 구축되어져야 할 것이다. 이러한 표준화 7단계를 통해 개발한 '위험물 최적 수송경로 도출 프로그램'과 '위험물 수송 안전관리 의사결정지원시스템'은 향후 SOC 건설, 비상대응 계획 등 '계획' 용으로 사용할 수 있다. 특히 고속국도, 일반국도 및 철도를 포함하는 복합수송에 대한 표준화가 가능하도록 확장성을 갖출 수 있다.

지금까지 살펴본 것과 같이 이러한 표준화 방안 및 프로그램을 활용하여 안전한 위험물 수송이 가능하도록 하고, 국토해양부와 경찰청 등 정부기관에서는 위험물 수송에 대한 정책 결정을 더욱 심도 있게 다룸으로써 국민의 생명과 재산을 보호하도록 노력해야 할 것이다.