위험물 운송 사고 저감을 위한 HAZ-RAM (Hazmat Transportation Risk Assessment Matrix) 개발

Development of HAZ-RAM for reducing HAZMAT transportation accident

정성봉* · 김연웅** · 박민규***

Chung, Sung Bong · Klm, Yeon Woong · Park, Min Kyu

Abstract

The accident of HAZMAT causes not only physical damage but also secondary accidents which makes negative effects in regional environment and society. Thus, based on a particular management system in HAZMAT transportation, it is necessary to prevent accidents and to minimize secondary damages. According to the accident data, the causes of accidents are human factor(62.8%), physical factor(9.9%), other factors(23.1%) and unknown factors(4.2%). Especially the most accidents related with human factor are caused by neglect of management and surveillance. In this study to minimize the risk caused by human factor, HT-RAM(Hazmat Transportation Risk Assessment Matrix) was developed using current RAM(Risk Assessment Matrix). For developing HT-RAM effectively, the following 3 factors are also considered. First, the type of HAZMAT accident is defined and classified. Secondly, the severity and the frequency are analyzed by accident type. Finally, the plan for management in transportation was suggested to reduce the risk and accident. In the future, HAZ-RAM developed in this research is applied to the HAZMAT transportation management system, it will reduce not only traffic accident but also the secondary damage caused by the accident.

Key words : Accident of HAZMAT, Risk of accident, HAZ-RAM, HAZMAT transportation management system

요 지

위험물 운송사고는 차량의 1차적인 피해(충·추돌) 뿐만 아니라 불특정다수, 환경에 직접적인 영향을 미치는 2차적인 사고를 내재하고 있다. 그렇기 때문에 위험물 사고관리는 일반 차량의 사고관리와는 달리 별도의 관리를 함으로써 사고를 미연에 방지하고, 2차피해를 최소화할 수 있는 체계적인 관리방안이 필요하다. 국내에서 발생한 위험물 사고의 발생 원인별 현황(2009년 기준)을 살펴보면 인적요인이 62.8%, 물적 요인이 9.9%, 기타요인 23.1%, 그리고 불명요인이 4.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히, 인적요인에 의한 사고 중 절반 이상이 관리 및 감시 부주의로 인한 사고로 인해 발생하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 이러한 요인으로 발생하는 사고위험을 최소화하기 기존 RAM(Risk Assessment Matrix)을 활용하여 HAZ-RAM(Hazmat Transportation Risk Assessment Matrix)을 개발하였다. HAZ-RAM의 개발을 위해 다음 3가지 측면에서 분석 체계를 구축하였다. 첫째, 위험물 사고의 유형을 세분화하여 정의하였다. 둘째, 위험물 사고를 유형별로 심각도와 빈도를 분석하였다. 마지막으로 위험물 운송경로상의 위험도를 파악하여 사고를 저감할 수 있는 운송관리방안을 제시하였다. 향후 본 연구에서 개발된 HAZ-RAM을 통해 위험물 운송관리가 이루어진다면, 단순 교통사고뿐만 아니라 위험물질 유출로 인한 2차 사고피해 또한 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 위험물 운송사고, 사고 위험, HAZ-RAM, 위험물 운송관리체계

1. 서 론

최근 들어 유류의 도유, 운송사고 등의 위험물 사고를 쉽게 접할 수 있다. 위험물의 사고는 일반교통사고와는 달리

크나큰 인적, 물적 피해를 내재하고 있다. 2009년 기준으로 국내 위험물 사고의 발생 원인을 살펴보면 인적요인이 62.8%, 물적요인 9.9%, 기타요인 23.1%, 불명요인 4.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히, 인적요인에 의한 사고 중

*정회원 서울과학기술대학교 철도경영정책학과 교수 (E-mail : sbchung@snut.ac.kr)

**서울과학기술대학교 철도경영정책학과 석사과정 (교신저자)

***(주)타앤지니어링 기술연구소 선임연구원

절반 이상이 관리 및 감시 부주의로 인한 사고로 인해 발생하는 것으로 조사되었다(소방방재청, 위험물 통계자료).

위험물 운송 사고는 사고가 발생하지 않도록 사전예방이 가능한 운송 관리체계의 구축이 필요하다. 하지만 국내 현황을 조사한 결과, 위험물 운송은 통합적인 관리체계가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이에 대한 근본적인 원인을 크게 3가지로 분석하였다. 첫째, 제도 및 법, 행정 부문이 개별적으로 관리가 이루어지고 있다. 둘째, 원가절감 등의 이유로 지입제가 확산되기 때문에 실질적인 운전자의 교육상태, 경로 선정 및 주차장의 확보 등에서 문제가 발생하고 있다. 셋째, 위험물 운송에 대한 O/D 및 DB의 구축이 부재하다는 것이다. 위험물 운송 사고에 대한 자료는 정보제공이 기초수준이기 때문에 사고에 대한 현실적인 정보를 분석하기가 어려운 실정이다.

선진국에서는 위험사고를 저감시키기 위한 방법론이나 연구개발들이 활발히 진행되고 있다. 미국의 경우 2003년부터 운수업체관리 정보체계(MCMIS)를 활용하여 시스템적인 관리를 하고 있으며 2008년부터는 위험물 차량에 대하여 노상검사를 통해 체계적으로 안전관리를 하고 있다. 일본에서는 2009년부터 안전성에 초점을 둔 G마크 제도를 도입하여 화주가 자발적으로 안전성의 평가 및 인증을 받는 시스템을 활성화하고 있다. 호주에서는 대형트럭의 과속·과로운전을 막기 위해 미리 고속도로의 진입허가를 받는 시스템을 이용하고 있다. 진입허가를 받기 위해서는 교통·도로부서인 RTA(Roads and Traffic Authority)사이트에 접속하여 출발지와 목적지를 입력하면 휴식시간 및 장소, 운행시간을 지정받게 된다.

본 연구에서는 우리나라의 실정에 맞는 위험물 운송 사고의 예방 및 저감을 체계적으로 관리할 수 있는 방안을 모색하였다. 일반적인 물류과정과 동일하게 위험물도 생산에서부터 소비단계까지의 일련의 과정들이 있지만 본 연구는 운송 부문에 국한하여 체계적으로 관리할 수 있도록 HAZ-RAM(Hazmat Transportation Risk Assessment Matrix)을 개발하였다. HAZ-RAM의 궁극적인 목표는 운전자가 어떤 종류의 위험물을 운송하기 위해 경로를 선정하였을 때, 경로상에 존재하는 위험요인을 사전에 예방하는데 있다. 운전자가 위험물을 운송하기 위해 경로를 선정하였을 때, 그에 대한 일련의 행동이나 시스템적인 대안을 제시하여 도착지까지 안전하게 운송을 돕게 하는 것이다.

연구의 과정으로는 Fig. 1에 제시한 것과 같으며 자료의 수집의 한계가 있어 분석의 전제조건을 설정하였다. 특히, 모든 위험물에 대한 자료가 없기 때문에 사고가 가장 많이 발생하는 유류(위험물안전관리법 상의 제4류), 유류를 운송하는 탱크로리차량을 대상으로 하였다.

본 연구의 가장 큰 핵심은 위험물 또는 위험물 사고의 심각도 및 빈도 수준의 등급조정을 어떻게 정의하느냐 하는 것이다. 왜냐하면 RAM기법의 한계가 분석가의 주관에 따라서 등급 및 범위가 달라지기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 향후 위험물 운송에 국한한 안전관리의 체계 구축을 위하여 나아갈 방향을 제시하고 그에 상응하는 대안을 마련하는데 그 목적이 있다.

2. 위험물 운송 현황 분석

2.1 위험물 사고 현황 및 분석

위험물 사고 분석을 위해 도로교통공단에서 제공하는 교통사고통계연보와 소방방재청의 위험물 통계자료를 사용하여 분석하였다. 자료는 최근 3개년도(2007년~2009년도)의 위험물 운송차량 사고를 대상으로 사고발생건수, 사망자수, 치사율, 사고원인이다.

Table 1은 차종 및 용도별 차량의 교통사고건수 및 치사율을 분석한 자료이다. 위험물 차량의 건수는 다른 차량에 비해 극히 적은 사고건수를 가지고 있다. 하지만 차량 종류별 치사율을 보면 2007년에는 사업용 컨테이너 차량이 10%로 가장 높은 수치를 보이고 그 다음으로 사업용 위험물 차량이 8%의 수치를 보인다. 3개년도를 전체적으로 분석하였을 때는 위험물 차량이 제일 높은 치사율을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 또한 위험물 차량의 사고는 일반차량과 다르게 1차적인 충, 추돌사고뿐만 아니라 적재하고 있는 위험물의 폭발에까지 이를 수 있으므로 더욱 위험하다. 또한 이로 인해 주변의 산간지방이나 주변시설물에 화재가 발생할 경우, 위험물이 유출되어 하천이나 강으로 흘러들어가는 경우 등 피해의 심각도는 광범위하다.

가장 높은 치사율을 가지고 있는 위험물 차량의 2007년도부터 2009년도까지의 사고 원인은, Table 2에서 제시된 바와 같이 물리적인 특성이나 도로여건의 사고보다는 운전자 요인이 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 경찰에서 제공하는 DB가 물적피해만 있는 사고는 제외를 시키기 때문인 것으로 사료된다.

운전자의 요인 중에서도 안전운전 불이행이 전체 사고의 절반 이상을 차지하고 있고 그 다음으로는 신호위반, 안전거리 미확보 등이 차지하고 있다. 물론 운전자의 안전 불감증에 대해 자체적으로 혹은 국가적으로 운전자에게 지속적으로 교육을 실시하고 있지만 부당한 교육비, 잦은 교육 등으로 운전자들은 거부감을 가지고 있는 실정이다. 따라서 거의 모든 운전자들은 운송중인 위험물에 대한 안전의식 또는 사고발생시 대처방안에 대한 이해 수준은 매우 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 1. 연구 수행 과정

Table 1. 차종 및 용도별 교통사고건수 및 치사율

(단위: 건, 인, %)

구분		총계	2007			2008			2009		
			발생건수	사망자수	치사율	발생건수	사망자수	치사율	발생건수	사망자수	치사율
사업용 차량	노선버스	20,148	6,449	184	3	6,532	195	3	7,167	190	3
	전세버스	2,836	823	58	7	970	43	4	1,043	72	7
	택시	89,142	29,537	291	1	29,593	319	1	30,012	288	1
	위험물	238	89	7	8	71	11	15	78	6	8
	청소차	85	31	1	3	28	2	7	26	0	0
	컨테이너	722	258	27	10	256	20	8	208	15	7
	콘크리트믹서	1,016	361	28	8	343	19	6	312	14	4
	화물	1,186	3,797	226	6	3,711	212	6	3,678	163	4
	렌트카	10,892	3,165	78	2	3,709	90	2	4,018	101	3
	기타	16,713	5,090	245	5	5,478	250	5	6,145	228	4
비사업용 차량	승용차	337,900	107,890	2,604	2	109,530	2,399	2	120,480	2,537	2
	버스	8,110	2,821	100	4	2,714	86	3	2,575	83	3
	어린이통학버스	1,238	442	19	4	414	14	3	382	13	3
	위험물	54	17	1	6	17	5	29	20	0	0
	청소차	74	22	1	5	22	1	5	30	3	10
	컨테이너	48	22	0	0	17	1	6	9	0	0
	콘크리트믹서	511	170	8	5	163	11	7	178	15	8
	기타화물	71,277	24,442	987	4	23,158	952	4	23,677	902	4
	이륜차	31,110	8,959	528	6	10,629	517	5	504	13,721	4
	원동기	21,646	6,744	385	6	7,302	347	5	7,600	324	4
	기타	20,414	6,623	255	4	6,455	254	4	7,336	254	3
자전거		6,143	1,374	69	5	2,130	83	4	2,639	88	3
기타불명		7,971	2,536	64	3	2,580	39	2	2,855	38	1
총계		659,474	211,662	6,166	3	215,822	5,870	3	231,990	5,838	3

※경찰DB(경찰에 의해 공식적으로 접수되어 조사, 처리된 교통사고를 대상으로 한 통계자료이며 물적피해만 있는 교통사고는 제외)

※도로교통공단 교통사고종합분석센터의 자료 인용

※사업용·비사업용 차량의 기타분류는 제시되어 있는 차량 외의 것들이며, 기타불명의 경우는 뺑소니 또는 원인을 모르는 사고의 경우임

Table 2. 위험물차량 사고유형별 사고건수

(단위: 건)

구분	총계	2007		2008		2009	
		발생건수	위험물	발생건수	위험물	발생건수	위험물
과로	8	3	-	3	-	2	-
과속	1,326	493	-	411	-	422	2
앞지르기방범위반	266	94	-	78	-	94	-
앞지르기금지위반	1,038	356	-	324	1	358	-
중앙선침범	42,242	14,262	11	13,653	7	14,327	5
신호위반	79,642	25,624	16	26,436	14	27,582	12
안전거리 미확보	68,236	21,698	16	21,984	5	24,554	14
서행 및 일시정지 위반	1,101	296	-	386	-	419	-
부당한 회전	5,314	1,737	3	1,806	-	1,771	1
통행우선순위 위반	286	108	-	77	-	101	-
진로양보 의무 불이행	713	225	-	227	1	261	-
안전운전 의무 불이행	361,107	115,976	46	118,791	46	126,340	50
교차로 통행방법 위반	49,030	16,268	5	15,617	11	17,145	6
보행자 보호의무 위반	17,485	5,501	2	5,641	-	6,343	2
차로위반(진로변경위반)	7,179	2,000	2	2,438	1	2,741	-
직진 및 우회전차의 통행방해	11,779	3,018	2	3,809	2	4,952	3
철길건널목 통과방법위반	35	12	-	11	-	12	-
긴급자동차 피양의무위반	2	2	-	-	-	-	-
기타(운전자 법규위반)	12,608	3,964	3	4,106	-	4,538	3
정비불량	32	7	-	9	-	16	-
보행자 과실	45	18	-	15	-	12	-
총계	659,474	211,662	106	215,822	88	231,990	98

※경찰DB(경찰에 의해 공식적으로 접수되어 조사, 처리된 교통사고를 대상으로 한 통계자료이며 물적피해만 있는 교통사고는 제외)

※도로교통공단 교통사고종합분석센터의 자료 인용

Fig. 2. 위험물 운송 관리체계 비교 (운송경로)

일례로, 2010년 12월 13일 22:30분경 서울외곽순환고속도로에서 발생한 사고의 경우, 운전자가 야간에 도유를 한 유류를 다른 유조차에 옮기기 위해 상차장소가 아닌 곳에 불법으로 주차하여 탱크로리의 유압펌프를 열고 야간이라 시야를 확보하기 위해 라이트를 켜자 유압펌프에서 새어나오는 유증기에 과열되어 폭발하게 된 사고이다. 이 사고로 인해 총 1,800억원의 수도권 물류 피해가 발생하였고 복구공사에만 대략 150억원이 소요된 것으로 보도되었다. 이 사고의 경우 운전자의 불법적인 행위가 요인이 되었지만 운송물질에 대한 기본적인 안전지식이 있었다면, 추가적인 경제적 손실은 막을 수 있었을 것으로 보인다.

2.2 위험물 운송 및 관리현황 분석

위험물 운송사고의 피해는 사고차량에 직접적인 인명피해와 재산피해 이외에도 사고와 관련이 없는 불특정다수에게 2차적인 피해를 줄 수 있다. 그렇기 때문에 위험물 운송 사고는 대응보다 예방하는 방안이 더욱 필수적이라 할 수 있다. 하지만 국내의 위험물 운송 및 관리체계는 위험물 운송사고의 대응방안에 초점이 맞추어져 있는 상태이다.

선진국에서는 육상운송에 있어서 위험도를 최소화하기 위하여 각종 법적, 제도적 장치를 개발하고 집행하고 있으며 그 대상 및 내용은 더욱 포괄적이고 강력한 규제로 가고 있다. 그러나 국내의 경우 위험도에 대한 인식이 부족하고 위험물과 관련하여 각종 법규가 관련부처별로 상이하여 통합적인 관리가 부재하고 관리체계가 허술한 실정이다.

특히 미국의 위험물 운송 관리체계를 비교하였을 때, 국내에서는 위험물 운송경로지정이나 위험도를 기반으로 경로를 선별하는 과정은 없으며, 운전자가 임의로 경로를 선정하여 최단거리를 선택하여 운송하고 있다. 또한 국내의 위험물 운송업체들을 조사한 결과 지입(위탁)운송이 70%이상을 차지하고 있기 때문에 위험물을 운송하는 운전자의 상태 및 교육

등의 파악이 어려운 실정이다. 즉 위험물 운송자는 생계를 유지하기 위하여 무리한 운행을 하고 있어 위험사고에 대해서 노출되어 있는 상태이다.

반면 미국은 경로를 지정하는 절차가 체계적이며, 사전 진단부터 시작하여 인구밀집도 및 도로유형 등의 위험도를 최소화할 수 있는 경로를 지정 및 공포하여 모니터링을 하는 단계까지 관리하고 있다(FHWA : Highway routing of hazardous materials: Guidelines for applying criteria, 1996).

2.2.1 국내 현황

국내 위험물에 있어 분류 및 관리는 각 소관부처별로 상이하다. 위험물 분류의 경우 환경부(유해화학물질관리법), 행정안전부(소방법), 국토해양부(해상안전법) 등에서 분류하고 있으며, 위험물 관리는 지식경제부(고압가스안전관리법), 환경부(유해화학물질관리법), 행정안전부(소방법), 경찰청(총포·도검·화약류 단속법), 국토해양부(해상안전법), 교육과학기술부(원자력법), 국토해양부(철도안전법), 지방자치단체(규정 및 지침) 등에서 관리하고 있다. 위험물 운송에 국한해서는 법이나 제도가 따로 없이 자동차운수사업법, 도로교통법, 교통안전법 등에서 관리가 되고 있다. 다만, 위험물의 공로운송에 대해서는 소방법에 의해 위험물운송관리규정이 이루어지고 있었으나 과거의 1995년 12월 소방법 시행규칙에서 명시한 운반경로 등에 관한 사항이 규제완화차원에서 전면 삭제되었다. 이로 인해 위험물제조소 설치허가증이 운행허가증과 동일한 효력을 가지게 되었다. 각 개별법의 운송기준에 의거하여 관리하고 있는 사항은 고압가스등 운반기준, 유독물 운반관리기준, 위험물 운반관리기준, 화물자동차 운행속도 기준에서 명시하고 있다.

2.2.2 국외현황

국외의 위험물 운송 관리는 일반법규, 위험물사고관련 데이

터베이스의 취합 및 관리, 안전운송방안을 위한 위험도분석 및 노선지정을 하고 있다. 또한 사고의 피해를 최소화하는 방안을 마련하기 위한 재난관리체계, 응급서비스, 사고방지기술 의무화, 운전자 교육 등이 이루어지고 있다.

미국의 경우, 운송관리는 운송업체정보관리시스템인 MCMIS (Motor Carrier's Management Information System)와 SafetyNet, 운수업체경영통계프로그램 등 3자의 통합적 정보관리시스템에 의해 이루어지고 있으며, 경영 및 운송실적, 교통사고 및 법규위반 기록, 노상검사 결과, 운전자 검사 등을 종합적으로 관리할 수 있도록 하고 있다. 이 중, 노상검사는 면허증 소지여부, 알코올 및 마약 투여 여부, 정규근무여부, 건강증명서 등을 검사하는 운전자 검사사항과 차량의 브레이크, 타이어, 라이트, 연료시스템, 방향지시등, 핸들, 적재상태 등을 검사하는 트럭 검사사항을 검사하고 있으며 불합격 시에는 즉시 운행을 중단시키는 조치를 취하고 있다.

호주의 경우, 대형트럭의 고속도로 진입허가를 받도록 규제하고 있다. 이는 운전자의 과속 및 과로운전을 막기 위해 시행되었으며, 운전자는 호주의 교통·도로부서인 RTA(Roads and Traffic Authority)사이트에 접속하여 출발지와 목적지를 입력한 뒤, 휴식장소와 휴식시간, 운행시간을 지정받게 되고 이를 준수하지 않으면 처벌을 받게 되어있다.

영국의 경우, 운행기록계를 통해서 근로시간, 지속적인 운행시간, 휴식시간 등을 규제하고 있다. 1969년부터 운전자 기반으로 시작되었으며, 점차 사회적인 안전관리를 인식하여 대부분의 회사에서 시행하고 있다. 운행시간을 ILO 협약을 통해 규제를 시행하고 있으며 세부적인 내용으로는 지속적인 운행시간을 4시간 이하로 제한하고, 운행업무 및 부수적 업무를 포함한 근로시간과 관련하여 최대 근로시간은 5시간을 넘지 않도록 규제하고 있다.

3. HAZ-RAM 개발

HAZ-RAM(Hazmat Transportation Risk Assessment Matrix)은 기존의 위험도 평가기법의 RAM을 활용하여 위험물 운송에 국한한 위험도를 평가하고 관리할 수 있는 기법이다. HAZ-RAM의 개발과정은 Table 3과 같이 크게 4단계로 구성된다.

3.1 사고유형정의 및 세분화

2장에서 살펴보았듯이 위험물 운송사고의 요인은 매우 다양하지만 정량적인 데이터 분석을 위하여 Table 4처럼 예방 가능한 사고와 예방 불가능한 사고로 구분하였다. 예방이 불가능한 사고는 환경적인 요인으로 태풍, 지진 등의 피할 수 없는 자연현상이다. 반대로 예방이 가능한 사고는 인적요인, 물적요인, 기타요인으로 세분화할 수 있다. 인적요인은 운전자의 신체적·심리적·생리적인 조건이나 위험의 인지와 회피 등에 대한 판단이다. 차량요인은 위험물 차량의 부품이나 결함 등에서 나타날 수 있는 요인이다. 구조요인은 이 두 가지의 요인을 제외한 부문으로 도로의 선형, 노면, 구배나 도로안전시설, 자연조건으로 인한 가시성 저하 등의 요인이다.

본 연구에서는 취득한 사고 자료가 물적피해만 있는 사고와 구조요인에 따른 사고는 제외되는 한계점이 있기 때문에 인적요인에 국한하여 연구를 진행하였다. 그리고 인적요인 중에서도 앞 절의 Table 2에서 제시한 사고 자료를 사용하여 해당기간(07년~09년)동안 위험물 차량 사고가 전혀 발생하기 않은 사고항목을 제외하여 분석을 실시하였다.

3.2 위험도(Risk) 분석

위험물 차량 사고는 특성상 2차적인 피해를 가지고 있기

Table 3. HAZ-RAM의 프로세스

Table 4 위험물 운송사고 요인

예방 가능한 사고		예방 불가능한 사고
인적 요인	과속, 과로, 음주, 졸음, 안전거리미확보, 주시태만, 중앙선침범, 추월불량, 통행 위반, 핸들과대조작 등	태풍, 지진, 해일 등의 피할 수 없는 자연현상으로 인한 환경요인
차량 요인	불법구조변경, 타이어마모, 부품결함 등	
구조 요인	좁은도로 폭, 선형불량, 노면불량, 구배정도, 도로안전시설불량, 가시성 미확보 구간 등	

출처 : 원제무, 최재성, 교통공학

Table 5 적용 가능한 사고항목

분석에 해당하는 사고항목 (13)	분석에서 제외시킨 사고항목 (8)
과속, 앞지르기 금지위반, 중앙선침범, 신호위반, 안전거리 미확보, 부당한 회전, 진로양보 의무 불이행, 안전운전 의무 불이행, 교차로 통행방법 위반, 보행자 보호의무 위반, 차로위반, 직진 및 우회전차의 통행방해, 기타(운전자 범규위반)	과로, 앞지르기방법위반, 서행 및 일시정지 위반, 통행우선순위 위반, 철길건널목 통과방법위반, 긴급자동차 피양 의무위반, 정비 불량, 보행자 과실

Fig. 3. 피해가능규모 유형(예시)

때문에, 차량사고의 피해규모정도를 나타낼 수 있는 정량적인 값이 필요하다. 이를 위해 위험도를 평가할 수 있는 위험도 분석 모형을 사용하였다. 여기서 말하는 위험도는 위험물 운송 시 예상되는 위험물 운송차량의 사고, 특히 위험물의 2차적인 피해를 수반하는 사고발생확률(Probability)에 비례하고, 동시에 사고발생지점에서의 피해가능규모(Consequence)에 비례한다. 즉 위험도는 식(1)과 같이 사고발생확률에 피해가능규모를 곱한 값으로 나타낼 수 있다.

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

사고발생확률(P)는 위험물 운송차량이 사고를 발생할 확률로써 링크(도로)길이와 주행차량의 대수에 영향을 받을 것이다. 우선, 단위 길이당 위험물 차량의 사고발생율(Accident Rate)을 구하고 사고 발생 시 위험물 노출가능성을 감안하여 식(2)과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서,

$P(R)$ = 링크 i 에서의 위험물운송차량이 야기하는 사고발생확률
 TAR_i = 링크 i 에서 위험물운송차량 사고발생율(accident vehicle/vehiclekm)

$P(R/A)_i$ = 링크 i 에서 사고 시 위험물질의 방출 및 누출, 폭발 확률

L_i = 링크 i 길이(km)

피해가능규모(C)는 위험물 운송차량사고로 인한 위험물 노출 시 피해가능규모이며, 사고발생지점과 장소, 위험물질별, 사고의 유형별로 전혀 다른 피해규모를 가진다. 예를 들어, 같은 위험물질을 싣고 가는 차량이 A(하천)라는 지점에서 사고가 발생한 것과 B(인구밀집지역)라는 지점에서 사고가 발생한 것과는 피해규모가 다르다.

결국 위험도의 피해는 무수히 많은 변수들(차량의 속도, 운전자의 성향, 도로의 형태 등)에 의해 결정되지만 아직까지 국내에서는 피해규모에 대한 정량적인 수치를 제시한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 피해규모를 크게 인구와 환경의 2가지 형태로 접근하였다.

인구노출규모(C_i^p)는 위험물 운송사고에 대한 해당 피해영향지역내의 인구밀도로써 링크 i 가 속해있는 행정구역(읍, 면, 동 단위)별 인구밀도를 말하며 식(3)과 같이 표현된다.

$$C_i^p = D_i^p \times S \quad (3)$$

여기서,

C_i^p : 링크 i 에서의 인구노출 기준의 피해가능규모(인)

D_i^p : 링크 i 의 해당 피해영향지역내 인구밀도 (인/km²)

S : 해당 피해영향지역의 면적(km²)

환경노출규모(C_i^e)는 위험물 운송사고에 대한 해당 피해영향지역내의 환경 인자를 고려한 조정된 면적을 말하며, 환경 인자는 하천 및 강을 대표적으로 선정하여 산정할 수 있으며 식(4)와 같이 표현된다.

Fig. 4. 위험도 등급화(Classification)

$$C_i^e = D_i^e \times S \quad (4)$$

여기서,

C_i^e : 링크 i 에서의 환경노출 기준의 피해가능규모 (km^2)

D_i^e : 링크 i 의 해당 피해영향지역내 환경밀도 (-)

S : 해당 피해영향지역의 면적 (km^2)

인구 및 환경노출규모의 산정은 ArcGIS 기능의 버퍼링(Buffering)분석과 중첩(Clip)분석을 사용하여 산정하였다. 산정된 결과를 토대로 위험도의 등급을 GIS의 Classification을 사용하여 HAZ-RAM의 등급과 동일하게 3개의 등급으로 구분하였다. Fig. 4는 위험물 사고를 기반으로 위험도를 산출한 결과를 Map으로 표현해주고 있다.

3.3 HAZ-RAM의 사고유형 재분류

HAZ-RAM을 구축하기 위하여 심각도와 빈도의 등급을 구분하여 사고유형을 분류하는 일련의 과정이 필요하다. 심각도의 등급기준은 사고로 인한 피해규모정도를 나타내는 것으로 그 값이 인명피해 및 환경피해, 물리적인 피해일 수 있다. 이것을 등급화하기 위해 정성적인 데이터를 정량화하는 과정이 필요하다. 예를 들어, 인명피해는 사고별 경상자, 중상자, 사망자들의 데이터를 등가사망지수로 환산하여 그 값이 1이하는 허용가능, 10이상은 허용불가능으로 등급을 구분할 수 있다. 환경피해와 물리적 피해는 허용가능범위의 여부를 사고의 피해를 복구하는데 걸리는 기간 및 복구비용, 피해액 등으로 구분할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 정량화된 수치가 없기 때문에 대표 값을 사용하여 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 심각도의 구분을 피해의 규모가 작은 정도의 등급인 Negligible의 등급부터 자연적인 현상 즉, 지진이나 해일, 홍수와 같은 피해로 규모가 아주 큰 정도의 등급인 Catastrophic의 등급까지 4개의 등급으로 구분하였다. 빈도의 구분은 거의 일어나지 않는 사고인 Rare등급부터 주변에서 흔히 볼 수 있고 매우 자주 발생하는 Certain등급까지 크게 5개의 등급으로 구분하였다. HAZ-RAM의 빈도와 심각도의 첫머리를 따서 각 Cell의 명칭을 정하였다. 각 Cell이 가지는 의미는 최종적으로 위험물 사고자료를 바탕으로 한 빈도와 심각도를 고려한 위험도가 될 것이다.

구분	심각도			
	Negligible	Marginal	Critical	CAtastrophic
Rare	RN	RM	RC	RCA
Unlikely	UN	UM	UC	UCA
Possible	PN	PM	PC	PCA
Likely	LN	LM	LC	LCA
Certain	CN	CM	CC	CCA

Fig. 5. 위험물 운송관리를 위한 HAZ-RAM 및 위험도 구분기준

각 Cell들의 특성을 고려하여 LOR(Level of Risk)의 등급을 3등급으로 구분하여 운송관리방안을 적용할 수 있도록 Fig. 5와 같이 Cell들을 그룹(Group)화 하였다.

3.4 HAZ-RAM을 이용한 운송관리방안

위험물 운송의 안전관리를 위하여 Table 6과 같이 HAZ-RAM의 LOR(Level of Risk)를 기준으로 5가지 관리방안 항목을 제시하였으며 LOR별로 필수항목과 선택항목으로 나누었다. 위험물 운송관리방안은 위험물 운송경로에 잠재되어 있는 위험요인¹⁾을 사전에 예방하여 위험도를 저감시키는 것을 말한다.

운송관리방안 항목의 범위를 크게 국가적 차원에서의 관리 측면과 실제 운송하는 운송자 측면, 운송자를 관리하는 관리자 측면으로 설정하였다. 국가적 측면은 개별적으로 산재되어 있는 위험물 관련법과 제도를 위험물 운송에 국한한 법·제도의 정비를 위한 법·제도 규정항목이 있으며 운송자측면은 운전자에게 안전의식을 심어줄 수 있는 매뉴얼 개발과 이를 어길시 Penalty를 부여할 수 있는 항목이 있다. 관리자 측면은 운송자의 여정이나 경로 및 위험물 정보 등을 관리할 수 있는 시스템 항목으로 설정하였다.

세부적으로 위험도를 저감시키는 방안 중 법·제도 규정은 위험물 운송의 현행법 및 제도를 통합화하거나 새로운 법안을 만들어 관리하는 것을 의미한다. 예를 들어, 위험경로 상에 LOR A의 위험요인이 있다면 그 경로에 대해서는 법·제도의 규정이 필수적으로 필요하다는 것이다. Manual 개발 및 관리는 관리자나 운영자가 Manual을 개발하여 위험구간을 운행할 때, 혹은 사고가 발생했을 때를 대비하여 운전자가 항상 Manual을 숙지하고 소지하고 있어야 하는 것을 말한다.

Table 6 운송관리방안

LOR (Level of Risk)	법제도 규정	Manual 개발 및 관리	Penalty 적용	시스템 개발 및 관리	자체 관리
A	○	○	○	○	-
B	○	○	○	△	-
C	-	△	-	△	○

※ ○ : 필수항목, △: 선택항목, - : 해당 없음

1) 위험요인은 위험물 운송경로상의 잠재되어 있는 요인을 말함. 예를 들면, 위험요인이 Fig. 5에 제시되어 있는 RN, PC, CC인지를 파악하는 것임.

penalty적용은 사고가 발생했을 경우 그 원인을 조사 분석한 결과 법이나 Manual을 위반했을 경우에 운전자 및 관리자에게 불이익 등을 부여하는 것이다. 시스템 개발 및 관리항목은 관리자가 system을 통하여 위험물 운송의 전반적인 내용을 관리하는 것으로 위험물차량의 휴식장소 위치, 경로관리, 운송정보, 운전자 및 차량안전점검관리 등을 관리할 수 있도록 하는 것을 말한다. 자체관리는 위험도가 낮은 등급을 대상으로 별다른 규정이 없어도 자체적으로 판단 및 관리를 할 수 있는 것을 의미한다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 위험물 운송사고의 체계적인 관리방안을 개발하기 위해 위험물 운송사고의 현황과 국내의 운송관리체계 현황, RAM(Risk Assessment Matrix)기법을 활용하여 HAZ-RAM을 구축하고 이를 효과적으로 활용하기 위한 방안을 수행하였다.

첫째, 위험물 운송사고 현황에서는 도로교통공단에서 취득한 2007년부터 2009년까지의 교통사고데이터를 기반으로 위험물차량의 사고와 사고의 원인을 살펴보았다. 그 결과 위험물 사고는 전체사고의 0.04%정도를 차지하였으며, 위험물사고의 원인은 안전운전불이행이 48.6%로 거의 대부분을 차지하였다. 둘째, 국내에서의 위험물 운송에 국한한 운송 관리가 이뤄지지 않았으며, 그 근본적인 원인은 8개의 소관부처와 12개의 법령에 의해서 이루어지고 있어 통합적인 관리의 어려움이 있다. 반면 국외에서는 위험물 운송에 관련하여 특정 단속과 규제를 통하여 위험물 차량에 대해서 관리를 하고 있다. 셋째, 이를 개선하기 위한 방안으로 HAZ-RAM을 제시하였다. HAZ-RAM은 위험물차량에 대해서 관리를 할 수 있도록 LOR(Level of Risk)개념을 도입하여 위험도를 등급화하였다. LOR A는 위험도가 높은 등급이며 필수항목의 관리 방안으로는 법·제도의 규정, 매뉴얼개발 및 관리, penalty적용, 시스템 개발 및 관리가 있다. LOR B는 위험도가 중간 등급으로 관리항목이 LOR A와 같지만 시스템 개발 및 관리 선택항목으로 두었다. LOR C는 위험도가 낮은 등급으로 자체관리를 통해서 관리를 할 수 있다.

본 연구의 한계점은 현재 위험물 운송사고의 위험도를 반영할 수 없다는 점이다. 즉, 위험물 차량의 사고는 1차적인 인명, 물질 피해와 더불어 위험물의 유출, 폭발 등의 2차적인 피해가 있음에도 불구하고 2차적인 피해에 대한 위험도를 산출할 수 있는 기준이 없기 때문에 2차적 피해를 고려하지 못한다. 따라서 본 연구의 향후 과제로는 현재 발생하고 있는 위험물 사고, 즉, 모든 사고 유형을 HAZ-RAM에 접목시킬 수 있어야 한다. 이를 위해 LOR의 범위를 구분할 수 있는 계량적인 값이 있어야 한다. 이를 계량화시키기 위해서는 모든 위험물 차량의 사고유형에 대한 2차적인 피해를 산출하여 위험도를 계산하고 LOR의 범위를 구체적으로 표현할 수 있는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원(R&D/07교통체계-물류04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 소방방재청 (2009) 2009년도 위험물 통계자료.
- 도로교통공단 (2007~2010) 교통사고 통계연보.
- 원제무, 최재성 (2001) 교통공학, 박영사, 2001년 개정판.
- 임삼진 (2010) 화물자동차 교통사고 감소방안, 화물자동차 교통사고 감소방안 세미나 자료.
- 안승범 (2002) [특별기고]육상에서의 위험물 운송, 가스뉴스.
- 김상암 (2003) 위험도 평가기법을 적용한 철도시스템의 안전관리, 한국철도학회 추계학술대회논문집.
- 이성원, 김건영 (2008) 도로에서의 위험물 운송관리체계구축 연구, 한국교통연구원, 수시연구
- 호주 New South Wales, <http://www.rta.nsw.gov.au/>, 교통국 홈페이지
- Australian Capital Territory (2005) Risk Management Framework.
- Barilla, D. (2009) Risk Assessment for Hazardous Materials Transportation, Applied Mathematical Sciences, Vol. 3, 2009, no. 46, 2295-2309.

© 논문접수일 : 11년 06월 23일
 © 심사의뢰일 : 11년 07월 05일
 © 심사완료일 : 11년 07월 08일