고속도로 교통안전시설물의 정성적 및 정량적 위험도분석 연구

A Study of Qualitative and Quantitative Risk Assessment for Highway Safety Facilities

지동한* 오영태** 최현호***
Ji, Dong Han O, Yeong Tae Choi, Hyun-Ho

요 약

교통시설물의 위험요소는 안전피해의 규모 및 종류 등 복잡한 제반요소에 영향을 받기 때문에 안전개념에 기초한 분석이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 교통안전시설에 대한 정성적 및 정량적 위험도분석 방법을 제시하고 이를 가치평가에 도입할 수 있는 절차를 제안하였다. 또한 정량적 분석을 위해 교통사고 데이터 및 이를 분석한 EPDO(Equivalent Property Damage Only)를 이용하여 사고빈도와 피해정도 및 사고요인별로 Event Tree를 작성하여 제시하였으며 이를 이용하여 중앙분리대 비교 1안(140cm) 및 비교 2안(127cm)에 대한 위험지수를 산정하였다.

키워드 : 정성적 위험도분석, 정량적 위험도분석, 교통안전시설물, 중앙분리대, 위험지수

1. 서론

국내 교통안전에 대한 사회적 관심의 증가로 인해 고속도로의 교통안전시설에 대한 투자 및 관련 사업이 지속적으로 이루어지고 있으며 그 규모는 점차적으로 확대되고 있는 추세이다. 그러나 이러한 교통안전시설에 대한 지속적인 투자 및 그 범위의 확대에 반하여 시설물 설치효과에 대한 분석 및 연구사례는 미흡한 실정이다.

국내 시설물 위험도분석과 관련하여서는 건설시공에 직접 참여하는 시공업체나 발주자 위주의 시공 안전관리는 일부 있으나, 본 연구의 대상인 교통안전시설물에 관한 위험도분석 연구는 거의 없는 실정이다. 또한 기 수행된 일부 사례들도 그 분석기법이 체계적이며 과학적이라기보다는 다분히 정성적인 수준에서 그치는 경우가 많아 기초적인 단계에 있다. 특히 본 연구의 대상인 중앙분리대의 경우, 교통사고원인의 다양성 때문에 무수히 많은 위험사건이 존재하게 된다. 이러한 위험사건을 기존의 정성적, 확정적인 방법에 의해서 의사결정을 내리게 된다면, 위험사건에 내재된 불확실성을 제대로 반영하지 못하게 되기 때문에 합리적인 방법이라고 보기 힘들다. 따라서 교통안전시설물 중 중앙분리대에서 발생할 수 있는 사고원인, 사고유형, 사고 후 차량상태 등과 같은 다양한 위험사건에 내재된 고유의 불확실성을 다루기 위해서는 이에 대한 실질적이고도 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 교통안전시설에 대한 정성적 및 정량적 위험도분석 방법을 제시하고 이를 가치평가에 도입할 수 있는 절차를 제안하였다. 또한 정량적 분석을 위해 교통사고 데이터 및 이를 분석한 EPDO(Equivalent Property Damage Only)를 이용하여 사고빈도와 피해정도 및 사고요인별로 Event Tree를 작성하여 제시하였으며 이를 이용하여 중앙분리대 비교 1안(140cm) 및 비교 2안(127cm)에 대한 위험지수를 산정하였다.

2. 중앙분리대의 개요 및 구성

중앙분리대는 충분한 폭을 확보하여 방호울타리 등과 같은 시설이 설치되지 않도록 하는 것이 교통안전 측면에서 볼 때 바람직하다. 그러나 우리나라의 경우 중앙분리대를 위한 충분한 용지 확보가 어려운 상황으로, 부득이 방호울타리나 연석 등을 이용한 중앙분리대가 일반적으로 설치되고 있다. 특히 도시부의 4차로 이상 일반도로에서 주행속도가 높고, 중앙선 침범에 의한 교통사고가 많은 곳이나 많을 것으로 예상되는 곳에는 방호울타

* 일반회원, 한국도로공사 기술심사실 실장, 박사수료, jdh57@ex.co.kr
** 일반회원, 아주대학교 교통공학과 교수, 공학박사, ytoh@ajou.ac.kr
*** 일반회원, 한국도로공사 기술심사실 책임연구원, 공학박사(교신저자), padre@ex.co.kr

리형 중앙분리대를 설치한다.

본 연구에서 적용하고자 하는 콘크리트 중앙분리대는 대표적인 강성 방호울타리이다. 이 분리대의 기하학적 형상은 차량 충돌시 차량의 거동 및 탑승자의 안전에 많은 영향을 끼친다. 아래 그림 1은 강성 방호울타리 중 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 형식의 형상을 나타내고 있다.

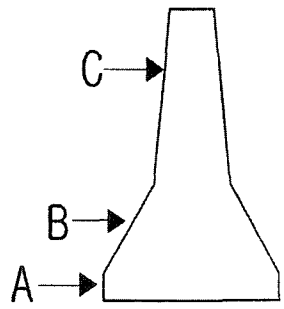


그림 1. 강성 콘크리트 중앙분리대 방호울타리

형상의 각 부분을 간단히 언급하면 다음과 같다.

- A : 콘크리트 중앙분리대 방호울타리 설치 이후의 재포장 시까지를 고려한 경우로써 차량 충돌시 차륜은 이곳을 쉽게 오르게 됨.
- B : 이곳은 차량 충돌시 콘크리트 중앙분리대 방호울타리와 충돌차량이 직접적으로 충돌을 일으키는 곳이며, 차량 충돌시 차량이 등판하여 콘크리트 중앙분리대에 충격에너지 분산효과 작용. 작은 각도의 차량 충돌시 차륜이 돌면서 차체 일부가 접촉되며 차륜이 이곳을 계속 등판하게 될 경우에는 차륜은 중앙분리대 길이방향을 향하면서 차륜은 표면과 계속접촉상태를 유지.
- C : 중앙분리대의 가장 큰 목적인 중앙분리대를 넘어 상대차로로 침범하는 사고를 방지하기 위해 설치.

3. 중앙분리대의 위험도분석

위험도는 사람이나 물질에 있어서의 부상 또는 손실의 가능성 및 중대성과 관련된 경제적 손실이나 인명피해의 척도를 정의한다. 공학적인 의미에서 일반적으로 위험도라고 하면 위험이 내재되어 있는 어떤 사건의 발생가능성과 어떠한 적절한 방식으로 측정된 사건의 결과(사망, 경제적 손실, 환경적 충격 등)의 조합으로 언급할 수 있다. 교통안전 시설의 위험도는 불확실성의 결과로서 시설물 목적에 영향을 주는 위험사건의 노출 가능성이라고 정의할 수 있다. 본 연구는 그러한 위험도를 예방하고자 하는 연구이며 이를 위해 정확한 위험도분석에 대한 개념을 확립할 필요가 있다.

일반적인 의미에서 교통안전시설물의 위험도분석은 "교통사고 등의 위험요소가 안전피해의 정도, 규모 등 여러 가지 복잡한 제반요소에 영향을 받으므로, 어떤 시설물이 어느 정도의 안전도를 지니게 되는지, 시설물의 안전에 위험요소가 얼마나 영향을 미치는지 등에 대한 효과를 예측하고 평가하여 안전성을 확보하는 것"이라고 말할 수 있다.

본 연구에서 적용하고자 하는 중앙분리대의 경우 차선을 왕복방향별로 분리하게 하고, 측방여유를 확보하기 위하여 도로중앙부에 설치하므로 높이가 낮을 경우 대형차량의 충돌에 따른 승월이나 전복을 방지하기 어렵다. 반면, 높이가 높을 경우 극한상태에서 충돌하는 충돌차량의 중앙분리대 승월은 막을 수 있겠지만 차량과 탑승객의 손상이 커지고, 경제적 낭비를 가져올 수 있다. 또한 중앙분리대는 차량 승월이나 전복을 방지할 뿐만 아니라, 탑승자에게 미치는 영향을 최소화 하여야 하기 때문에 안전도 차원의 설계를 수행할 수 있도록 유도하기 위해 위험도(Risk) 개념을 도입하고자 한다.

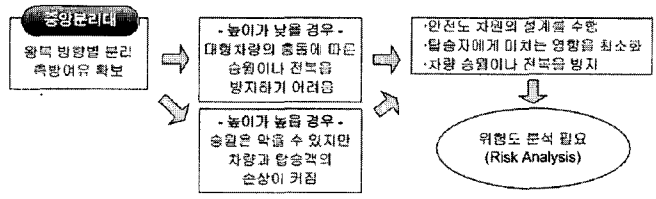
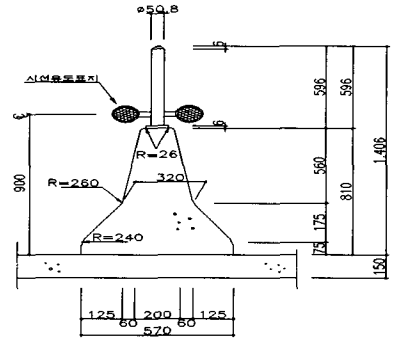
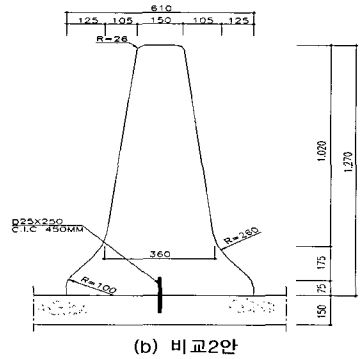


그림 2. 중앙분리대의 위험도 분석



(a) 비교 1안



(b) 비교2안

그림 3. 중앙분리대 비교1안 및 2안의 횡단면도

본 논문에서는 교통안전시설물 중 중앙분리대에 대한 위험도 평가모형 및 절차를 제안하고, 위험요소 규명을 통한 Checklist를 개발하였다. 또한 제안한 위험도 분석 절차를 기반으로 정성적 위험도 분석을 실시하기 위하여 전문가 설문조사를 실시하였으며, 정량적 위험도분석을 위하여 고속도로 구간의 중앙분리대 관련 교통사고 데이터를 이용하였다. 현재 고속도로에 사용중인 높이 기존 140cm (81cm 콘크리트 중앙분리대 + 59cm 방현망), 개선된 127cm 중앙분리대를 사고조사 사전·사후분석 적용사례로 선정하였으며, 그림 3에서 중앙분리대 높이 140cm는 비교 1안, 높이 127cm는 비교2안으로 선정하였다.

3.1 위험요소 수집 및 시나리오 작성

위험요소 수집 및 시나리오 작성 단계는 "어떤 사고에 내재되어 있는 위험요소에 대한 존재여부를 인식하고 그 위험요소들이 원인이 되어 발생될 수 있는 안전사고들을 정의하는 과정"이다. 이는 위험요소 규명 및 Checklist 작성을 위한 기초 자료로 활용된다. 위험요소 체크목록에서 고려되어야 할 사항들이 누락이 되지 않도록 관련된 기존 연구 자료와 전문가 인터뷰 등의 다양한 접근방법을 활용하여 가급적 철저히 조사를 실시하여, 대상 사고에 내재되어 있는 위험요소들에 대해 보다 구체적으로 인식하고 숨겨져 있는 위험요소들을 유형별로 분류하여야 한다.

표 1. 교통사고유형별 위험요소

위험요소					
사고유형	차량유형	2차사고 유형	안전사고유형	기하구조	중분대 유형
·충돌 후 정차 ·충돌 후 전도 ·충돌 후 차량 전복 ·중분대에 올라타는 사고 ·충돌 후 대향차로 침범 ·충돌 후 화재 및 폭발 ·기타 사고	·1톤 미만 ·1~8톤 ·승합차 &버스 ·8톤 이상	·발생하지 않음 ·중분대 파편에 의한 사고 ·타차량과 충돌사고	·인명 피해 ·물적 손실	·직선구간 ·곡선구간 ·곡선경사 구간	·140cm (비교 1안) ·127cm (비교 2안)

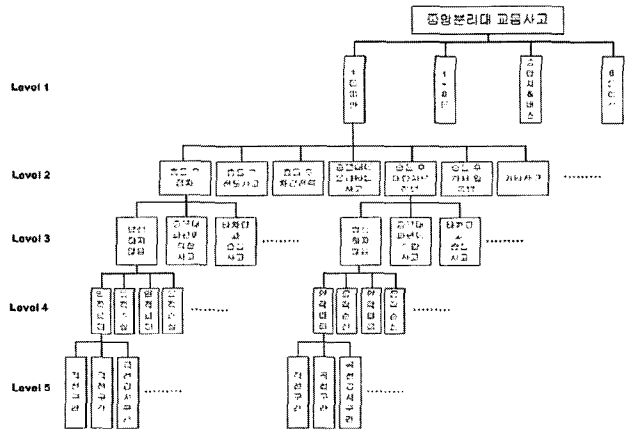


그림 4. 중앙분리대의 정성적 Event Tree (예)

다음 표 1에서는 교통사고요인에 따라 발생 가능한 중앙분리대 사고유형들을 위험요소로 규명하였다. 각각의 위험요소는 사고유형, 차량유형, 안전사고유형, 기하구조로 나누어 질 수 있고, 사고 발생 시 차량유형과 1차사고 후에 발생하는 2차사고의 유무에 대하여 분류하였다. 도출된 위험요소별 유형에 상관관계나 상·하위 레벨을 고려하여 그림 4와 같은 정성적 Event Tree 선도를 작성함으로써 위험요소 시나리오를 규명하였다. 이러한 위험요소별 유형이나 상관관계는 Checklist 개발을 위한 중요한 자료가 된다.

3.2 위험요소 중요도 산정

위험요소의 중요도(Importance) 산정은 위험요소에 의해 발생 가능한 "교통사고의 발생 빈도 및 피해 규모를 산정하는 과정"으로서 앞에서 작성된 시나리오를 바탕으로 위험요소 항목들에 대한 중요도를 산정하여야 하며, 이는 향후 위험도분석 시 중요한 평가 자료로 활용될 것이다. 중요도에서 발생빈도는 실제 사건 발생수를 통해, 피해규모는 사망자수 및 부상자 등을 통해 객관적이고 정량화할 수 있는 방법을 사용하였다. 또한 중요도 산정을 위하여 위험도 접근방식(Risk-based Approach)에 기초를 둔 Risk Matrix 방법을 이용하였다.

다음 표 2에서 위험도를 발생빈도와 피해규모로 세분하여 Magnitude(피해규모)와 Frequency(발생빈도)에 대한 평가를 기반으로 중요도를 산정하였다.

표 2. 위험도 접근방식에 의한 위험요소 중요도 산정표

구분		피해규모		
		Low	Medium	High
발생빈도	Low	Low	Low	Medium
	Medium	Low	Medium	High
	High	Medium	High	High

표 2에서 제시하는 위험도 접근방식에 의한 위험요소 중요도를 산정하기 위해서는 정성적이거나, 정량적인 지표가 필요하다. 이러한 데이터는 후에 Checklist를 통한 위험도 분석에도 사용되어 진다. 정성적인 지표로는 전문가 집단에 의한 설문조사가 있고, 정량적인 지표는 교통사고 데이터 조사가 있다. 각각을 통해 중요도를 산정하여 필요한 경우 개선된 시나리오를 재작성하고, 재작성 된 시나리오를 비교 분석하여 개선된 시나리오를 작성할 수 있다.

전문가 설문조사를 통한 중요도 산정

가용한 기본데이터가 부족하거나, 기존자료의 반영이 어려워 신뢰도가 낮은 부분의 중요도 산정을 위해 전문가 및 실무관련

자의 설문조사를 수행하여 중요도를 산정하였다. 설문대상 집단은 폭넓은 의견을 반영하기 위하여 고속도로 순찰대 경찰, 교통관련 연구원, 설계실무자를 대상으로 선정하였다. 그리고 반영사항에 대한 의견수렴을 통해 실효성 있는 설문조사가 되도록 최대한 설문 문항을 구성하였고 중복답변이 가능하도록 하여, 많은 의견이 포함될 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 설문조사 결과 값을 상호 비교하였으며, 이를 바탕으로 각각의 위험요소가 가지는 빈도와 규모를 비교하여 중요도를 결정하였다. 중요도 산정을 위한 정성적 위험도분석 시나리오로는 Level 1~4까지 Level 1 기준 각 1톤미만 24개, 1~8톤 18개, 승합차&버스 30개, 8톤이상 24개가 선정되었으며, 이는 설문조사 결과 위험도가 낮은 하위 10%의 시나리오는 제외한 것이다. 이를 다시 Level 5 기준 3가지 기하구조로 세분하면 각 대안에 대한 시나리오가 288개가 되며, 두 대안에 대한 전체 정성적 위험시나리오의 분석 개수는 576개이다. 다음 표 3은 정성적 위험도분석 시나리오 전체 576개의 사건중요도 산정결과 중 일부의 예를 보인 것이다.

표 3. 위험요소의 중요도 산정 결과(예)

위험요소			안전사고 유형	사건중요도	
차량 유형	사고유형	2차사고		Frequency	Magnitude
1톤 미만	충돌 후 정차 사고	발생하지 않음	인명피해	High	Low
			물적손실	High	Low
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Medium	Low
			물적손실	Medium	Low
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Medium	Low
			물적손실	Medium	Low
	충돌 후 전도 사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Low
			물적손실	Medium	Medium
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Medium	Medium
			물적손실	Medium	Medium
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Medium	Medium
			물적손실	Medium	Medium
	충돌 후 중분대에 올라타는 사고	발생하지 않음	인명피해	Low	Medium
			물적손실	Low	Medium
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Low	Medium
			물적손실	Medium	Medium
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Low	Medium
			물적손실	Low	Medium
	충돌 후 전소 및 폭발사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Medium
			물적손실	Low	Medium
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Medium	High
			물적손실	Medium	High
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Medium	High
			물적손실	Medium	High
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

교통사고 데이터를 이용한 중요도 산정

교통사고 데이터를 이용하여 '01년부터 ' 06년까지 중앙분리대 유형별 분류를 통해 중요도 산정을 실시하였다. 사고 데이터는 한국 도로공사의 1998년~2006년까지의 교통사고 속보자료를 바탕으로 전체 교통사고 중 중앙분리대 관련사고를 추출하여 분석하였으며, 분석대상구간으로는 사전 · 사후분석구간으로 경부선 비상활주로 구간(347.3~350.5km), 폐쇄식 고속도로 구간으로 중앙고속도로 남안동IC~단양IC (179.38km~233.56km), 개방식 고속도로 구간으로 서울외곽순환도로 판교JCT~안현JCT (0~30.33km)구간을 함께 분석하여 자료의 부족으로 인한 오차 발생을 최소화하였다. 경부고속도로의 경우에는 '01년부터 '05년까지는 기존 140cm (81cm 콘크리트 중분대 + 59cm 방현망)의 높이를 가지는 중앙분리대에 대한 사고 자료이고, '05년부터 '06년도 사고 데이터는 127cm의 높이를 가지는 중앙분리대의 사고 자료이다. 사고데이터는 6개월 단위로 조사되었고, 인명피해와 물적손실의 동등한 비교를 위해 대물피해환산법(EPDO)을 사용하였다. 대물피해환산법은 사고유형에 따라 피해정도를 나타내는 지수를 적용하여 이를 근거로 사망사고, 부상사고, 물적손실의 각 피해종류를 등가로 환산하여 하나의 피해단위로 산정하는 방법이다. 우리나라에서는 물적손실 1, 부상사고 3, 사망사고 12의 가중치를 적용(원재무 등, 2001)하고 있으므로 이를 기준으로 적용하여 다음과 같은 EPDO 계산식를 나타낼 수 있다.

$$EPDO = 12\times(\text{사망사고건수}) + 3\times(\text{부상사고건수}) + \text{물적손실사고건수}$$

표 4. 위험요소 중요도 산정(예)

위험요소			안전사고 유형	EPDO
차량 유형	사고유형	2차사고		
1톤 미만	충돌 후 정차	발생 하지 않음	인명피해	63.50
			물적손실	23.50
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	6.75
			물적손실	2.75
		타차량과 충돌사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
	충돌 후 전도 사고	발생 하지 않음	인명피해	1.00
			물적손실	1.25
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	3.50
			물적손실	0.0
		타차량과 충돌사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
	충돌 후 차량 전복 사고	발생 하지 않음	인명피해	18.25
			물적손실	3.50
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
		타차량과 충돌사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
	충돌 후 중분대에 올라타는 사고	발생 하지 않음	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
		타차량과 충돌사고	인명피해	0.0
			물적손실	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

EPDO 계산식에 근거한 주요 교통사고 분석결과는 첨부에 기술하였으며 이를 요약하면 다음과 같다. 사고 1건당 EPDO(SI)는 비상활주로 구간에서 127cm일 때 2.7로써 140cm 중앙분리대일 때 10.0보다 감소되었으며, 중앙고속도로에서는 127 cm 구간에서는 1.3으로써 140cm 구간의 3.0보다 낮은 값을 갖는 것으로 분석되었다. 서울외곽순환도로의 경우 127 cm 구간에서는 1.4로써 140cm 구간의 2.4보다 낮은 값을 갖는 것으로 분석되어, 세 구간 모두 127cm 구간에서 사고 1건당 EPDO값이 낮게 조사되었다. 백만차량-km당 사고건수(사고율법)는 비상활주로 구간에서 127cm일 때 0.0092로써 140cm 중앙분리대일 때 0.0249보다 감소되었으며, 중앙고속도로에서는 127 cm 구간에서는 0.0050으로써 140cm 구간의 0.0122보다 낮은 값을 갖는 것으로 분석되었다. 서울외곽순환도로의 경우 127 cm 구간에서는 0.0011로써 140cm 구간의 0.0018보다 낮은 값을 갖는 것으로 분석되어, 세 구간 모두 127cm 구간에서 백만차량-km당 사고건수가 낮게 조사되었다.

이와 같은 조사결과를 바탕으로 사고데이터의 EPDO값을 이용한 중요도 산정을 수행하였다. EPDO값은 이미 그 값에 빈도와 규모가 포함되어 있으므로 빈도와 규모를 따로 계산하여 위험지수를 산정하지 않고, 사고시나리오별 EPDO 값을 통해 다음 표 4와 같이 중요도를 산정하였다. 정량적 위험 시나리오는 분석기간 동안 발생하지 않은 사건에 대한 시나리오를 제외한 전체 92개(비교 1안, 2안 각 46개)의 위험 시나리오를 분석하였으며, 다음 표 4는 정량적 위험도분석 시나리오의 사건중요도 산정결과 중 Level 5 (기하구조)를 제외한 일부의 예를 보인 것이다.

3.3 위험요소 Checklist 개발

앞서 도출된 전문가 집단 설문조사와 교통사고 데이터의 사건중요도를 취합하여 사고유형별 위험도분석을 위한 Checklist를

표 5. 비교1안 및 비교2안에 대한 정성적 위험도분석 Checklist(예)

위험요소			안전사고유형	사건중요도	직선구간		곡선구간		곡선경사구간	
차량유형	사고유형	2차사고			평가등급	위험등급	평가등급	위험등급	평가등급	위험등급
1톤 미만	충돌 후 정차	발생하지 않음	인명피해	High	-	-	-	-	-	-
			물적손실	Medium	-	-	-	-	-	-
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	High	-	-	-	-	-	-
			물적손실	High	-	-	-	-	-	-
		타차량과 충돌사고	인명피해	High	-	-	-	-	-	-
			물적손실	Medium	-	-	-	-	-	-
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

표 6. 비교1안 및 비교2안에 대한 정량적 위험도분석 Checklist(예)

차량유형	EPDO	사고유형	EPDO	2차사고유형	EPDO	안전사고유형	EPDO	기하구조	EPDO
1톤 미만	-	충돌 후 정차	-	발생하지 않음	-	물적손실	-	직선구간	-
		충돌 후 전복	-	발생하지 않음	-	물적손실	-	직선구간	-
		중분대 올라탐	-	발생하지 않음	-	인명피해	-	곡선구간	-
		충돌 후 대향차로 침범	-	발생하지 않음	-	물적손실	-	곡선구간	-
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

작성하였으며 향후 위험도분석을 실시하기 위한 평가 sheet로 활용할 수 있도록 나타내었다. 본 연구에서 제안하는 Checklist는 앞선 그림 2에 보인 바와 같이 Level 1 (차량유형), Level 2 (사고유형), Level 3 (2차사고), Level 4 (안전사고유형), Level 5 (기하구조)의 순으로 나타내었으며, 다음 표 5와 표 6은 각각 설문조사를 이용한 위험도분석 Checklist(예) 및 교통사고 데이터를 이용한 위험도분석 Checklist(예)를 나타내었다.

3.4 위험도 분석(Risk Analysis) 모형

본 논문에서 제안한 위험도분석 모형은 크게 7단계로 구성하였다. 우선 1)중앙분리대의 일반 사항을 검토하고, 2)구조물에 대한 위험요소 수집 및 3)사고 시나리오를 작성하여, 4)전문가 집단 설문조사 및 중앙분리대 사고 데이터 분석을 통한 위험요소의 사건 중요도 산정 후, 이에 따른 5)위험도분석 Checklist 개발, 6)이와 같은 절차에 의해 개발된 위험도분석 Checklist를 기반으로 각각의 비교 대안에 대하여 위험지수를 산정함으로써 7)위험도 분석을 수행할 수 있다.

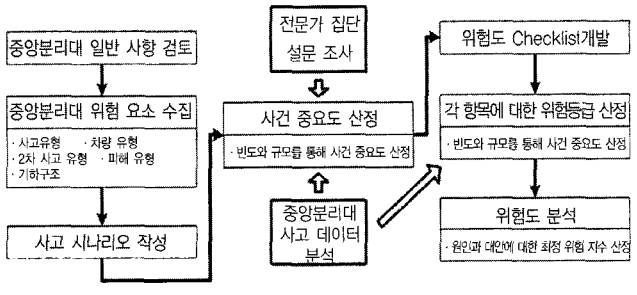


그림 5. 위험도 분석(Risk Analysis) 절차

이러한 위험도 분석의 결과로 얻어지는 위험 지수는 중앙분리대 가치공학(Value Engineering)적 판단 기준이 될 수 있으며 최대가치(Best Value)를 지향할 수 있는 판단근거가 된다.

표 7. 비교 1안 및 비교 2안의 중앙분리대 평가등급 변환 값

구 분	비교 1안				비교 2안			
	Magnitude 설문 값	Frequency 설문 값	평균값	평가등급	Magnitude 설문 값	Frequency 설문 값	평균값	평가등급
충돌 후 정차사고	29.17	77.17	53.17	Good	20.83	16.67	18.75	Excellent
충돌 후 전도사고	16.67	25.00	20.84	Excellent	41.67	45.83	43.75	Good
충돌 후 차량전복사고	45.83	19.00	32.42	Excellent	45.83	50.00	47.92	Good
충돌 후 중분대에 올라타는 사고	77.50	40.00	58.75	Poor	8.33	5.00	6.67	Excellent
충돌 후 대향차로 침범	83.33	61.67	72.50	Poor	8.33	4.17	6.25	Excellent
충돌 후 화재 및 폭발	86.67	33.33	60.00	Good	41.67	25.00	33.34	Good
1톤 미만	21.67	41.67	31.67	Good	12.50	28.33	20.42	Excellent
1~8톤	38.33	50.00	44.17	Good	6.67	12.50	9.59	Excellent
승합차 & 버스	66.67	30.22	48.45	Good	18.33	28.97	23.65	Excellent
8톤 이상	53.33	79.17	66.25	Marginal	24.17	4.17	14.17	Excellent
발생하지 않음	34.17	45.83	40.00	Good	26.67	33.33	30.00	Good
중분대파편에 의한사고	40.83	22.50	31.67	Good	56.67	43.50	50.09	Marginal
타차량과 충돌에 의한사고	66.67	38.33	52.50	Marginal	22.50	20.83	21.67	Excellent
인명피해	40.83	91.67	66.25	Marginal	26.67	4.17	15.42	Excellent
물적피해	25.00	83.33	54.17	Marginal	56.67	8.33	32.50	Good
직선구간	34.17	54.17	44.17	Good	28.33	11.20	19.77	Excellent
곡선구간	58.33	58.33	58.33	Marginal	25.00	25.00	25.00	Good
곡선경사구간	62.50	50.83	56.67	Marginal	20.83	20.83	20.83	Excellent

표 9. 비교 1안에 대한 구간별 위험등급 산정결과 일부(예)

위험요소			안전사고 유형	사건 중요도	직선구간		곡선구간		곡선경사구간	
차량 유형	사고 유형	2차사고			평가등급	위험등급	평가등급	위험등급	평가등급	위험등급
1톤 미만	충돌 후 정차 사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
			물적손실	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Low	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
			물적손실	Low	Good	Low	Excellent	Low	Marginal	Medium
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Low	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
			물적손실	Low	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	충돌 후 화재 및 폭발사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium	Marginal	Medium
			물적손실	Low	Good	Low	Good	Low	Marginal	Medium
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	High	Marginal	High	Marginal	High	Marginal	High
			물적손실	High	Good	Medium	Excellent	Medium	Marginal	High
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	High	Marginal	High	Marginal	High	Marginal	High
			물적손실	High	Marginal	High	Marginal	High	Marginal	High
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

표 10. 비교 2안에 대한 구간별 위험등급 산정결과 일부(예)

위험요소			안전사고 유형	사건 중요도	직선구간		곡선구간		곡선경사구간	
차량 유형	사고유형	2차사고			평가등급	위험등급	평가등급	위험등급	평가등급	위험등급
1톤 미만	충돌 후 정차 사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Excellent	Low	Excellent	Low	Excellent	Low
			물적손실	Medium	Excellent	Low	Good	Medium	Excellent	Low
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	Low	Good	Low	Good	Low	Good	Low
			물적손실	Low	Good	Low	Good	Low	Good	Low
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	Low	Excellent	Low	Excellent	Low	Excellent	Low
			물적손실	Low	Excellent	Low	Excellent	Low	Excellent	Low
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	충돌 후 화재 및 폭발사고	발생하지 않음	인명피해	Medium	Excellent	Low	Good	Medium	Excellent	Low
			물적손실	Low	Good	Low	Good	Low	Good	Low
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	High	Good	Medium	Good	Medium	Good	Medium
			물적손실	High	Good	Medium	Good	Medium	Good	Medium
		타차량과 충돌에 의한 사고	인명피해	High	Excellent	Medium	Excellent	Medium	Excellent	Medium
			물적손실	High	Good	Medium	Good	Medium	Good	Medium
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4. 위험도분석 결과

4.1 전문가 설문조사를 통한 정성적 위험도분석 결과

정성적 위험도분석을 위하여 설문지 질문 중 비교 1안과 2안의 상대 비교에 대한 항목을 이용하여 구간별 평가등급을 결정하였다. 즉 설문에서 각각 피해규모와 발생빈도의 설문결과를 백분율 (%)로 환산하여 설문 값으로 나타내었으며 이중 0~25%는 Excellent, 25~50%는 Good, 50~75%는 Marginal, 75~100%는 Poor로 다음 표 7과 같이 변환하였다.

표 8. 위험요소별 위험등급 산정표

구분		위험요소별 사건중요도 (Magnitude & Frequency)		
		Low	Medium	High
평가등급	Excellent	Low	Low	Medium
	Good	Low	Medium	Medium
	Marginal	Medium	Medium	High
	Poor	Medium	High	High

위와 같이 결정된 중요도와 평가등급에 대해 표 8을 사용하여 구간별 위험등급을 결정하였다. 표 9와 표 10은 구간별 비교 1안과 2안의 위험도분석 일부의 결과를 보여주고 있다. 마지막으로 앞에서 산정된 각각의 구간별 위험등급 및 평가항목에 대해 Risk Matrix 방법(Hiroshi Wada, 2002)을 사용하여 위험등급 High에 5점, Medium에 3점, Low에 1점을 부여하였으며 이를 이용하여 다음 표 11에서 보는 바와 같이 위험지수를 산정하였다.

표 11. 정성적 위험도분석을 이용한 위험지수 산정결과

구분	비교 1안		비교 2안	
위험등급	High	86	High	10
	Medium	188	Medium	140
	Low	14	Low	138
위험지수	1008		608	
선정			※	

위험지수 결과 값을 비교하여 보면 비교 1안(1008)의 위험지수가 비교 2안(608)에 비해 약 1.6배의 높은 위험지수를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 비교 1안의 경우 위험등급으로 Medium이 188개나 산정된 반면, 비교 2안의 경우 Low가 138개나 산정된 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 이러한 결과는 다음의 정량적 위험도분석결과와 비교분석하여 VE분석에 적용될 수 있다.

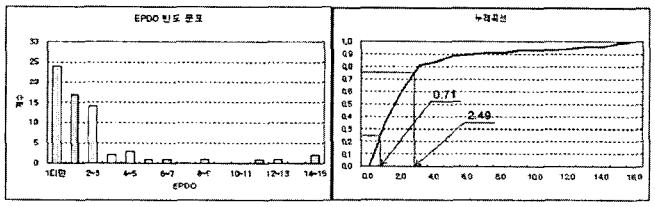
4.2 교통사고 데이터를 이용한 정량적 위험도분석 결과

비교 1안과 비교 2안의 사고시나리오의 기하유형별 EPDO값을 위험지수 값으로 변환하기 위해 사고시나리오별 EPDO값의

표 12. EDPO를 사용하여 비교 1안과 2안의 위험등급 산정 일부(예)

차량 유형	사고유형	2차사고 유형	피해유형	기하구조	비교 1안		비교 2안	
					EPDO	위험등급	EPDO	위험등급
1톤미만	충돌 후 정차	발생하지 않음	인명피해	직선구간	8.75	High	1.67	Medium
				곡선구간	2.00	Medium	0.00	Low
				곡선경사구간	1.00	Medium	0.00	Low
			물적손실	직선구간	12.00	High	2.00	Medium
				곡선구간	2.50	High	1.67	Medium
				곡선경사구간	0.75	Medium	0.00	Low
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	직선구간	2.50	High	0.00	Low
				곡선경사구간	1.25	Medium	0.00	Low
	충돌 후 전도	발생하지 않음	인명피해	직선구간	11.00	High	1.33	Medium
			물적손실	직선구간	1.75	Medium	0.33	Low
				곡선경사구간	0.25	Low	0.00	Low
		중분대 파편에 의한 사고	인명피해	직선구간	3.50	High	0.00	Low
	충돌 후 차량 전복	발생하지 않음	인명피해	직선구간	2.00	Medium	0.00	Low
				곡선구간	2.00	Medium	0.00	Low
				곡선경사구간	1.00	Medium	0.00	Low
			물적손실	직선구간	2.00	Medium	0.00	Low
				곡선구간	1.00	Medium	0.33	Low
				곡선경사구간	0.25	Low	0.00	Low
	중분대에 올라탐	발생하지 않음	인명피해	직선구간	1.00	Medium	0.00	Low
	충돌 후 대향차로 침범	타차량과 충돌사고	인명피해	직선구간	4.25	High	0.00	Low
			물적손실	직선구간	0.50	Low	0.33	Low
	충돌 후 화재 및 폭발	발생하지않음	물적손실	직선구간	0.25	Low	0.00	Low

빈도분석을 실시하였다. 그림 6의 좌측에는 빈도분포를 나타내었고, 우측에는 그 값의 누적분포를 나타내었다. 이를 통해 비교 1안 및 2안에 대한 기하유형별 EPDO 값을 0~0.71(0~25%)까지는 Low, 0.71~2.49 (25%~75%)까지는 Medium, 2.49~15 (75%~100%)까지는 High로 변환하여 적용하였다.



EPDO	위험등급
0~0.71	Low
0.71~2.49	Medium
2.49~15	High

그림 6. EPDO의 빈도분석 및 위험등급 산정표

기하유형별 EPDO의 값을 최종 위험등급으로 변환하여 다음 표 12에 비교1안과 비교2안의 위험등급을 나타내었다. 항목별 위험등급으로 비교 1안과 비교 2안을 적절히 비교하기 위해 위험등급별 점수를 부여하고 위험지수를 산정함으로서 각 비교안의 비교우위성을 파악하고자 하였다. 앞에서 산정한 Risk Matrix 방법을 동일하게 사용하여 다음 표 13에서 보는 바와 같이 비교 1안과 비교 2안의 위험지수를 산정하였다. 비교 1안과 비교 2안에 대해서 합산된 위험지수는 비교 1안은 138점, 비교 2안은 86점으로 비교 2안이 비교 1안보다 52점 우위에 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 비교 1안 대비 비교 2안은 안전성 측면에서 개선된 사실을 확인할 수 있었다.

표 13. 정량적 위험도분석을 이용한 위험지수 산정결과

구분	비교1안		비교2안	
위험등급	High	15	High	5
	Medium	16	Medium	10
	Low	15	Low	31
위험지수	138		86	
선정			※	

4.3 교통사고 데이터와 설문조사의 위험지수 결과 비교

결과 값을 비교하여 보면 두 가지 분석 모두 비교2안의 위험지수가 낮게 나왔지만 설문조사와 사고데이터 분석 결과의 위험지수 값이 각각 1008 vs 608 및 138 vs 86으로 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 설문조사를 결과를 이용하여 작성된 Checklist의 사고시나리오와 교통사고 데이터에 의한 사고시나리오의 수가 차이나기 때문이다. 정성적 위험도분석의 경우 Checklist 상에 사고유형별 시나리오 수가 비교 대안 당 288개이며 총 576개 경우이다. 교통사고 데이터를 이용한 정량적 위험도분석의 경우 Checklist 상에 사고 시나리오 수가 비교 대안 당 46개이며 총 92개이다. 따라서 비교 1안보다 비교 2안이 안전성에서 우위를 보인다는 분석 결과는 다음 표 14에 보인바와 같이 1.658배와 1.604배로 서로 다른 두 가지 경우의 분석이 비슷한 차이를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이번 연구의 경우 우연히 거의 일치하는 결과는 보여준 것이며 모든 정성적 및 정량적 위험지수의 비교결과가 비슷할 것이라는 것을 의미하는 것은 아니다.

표 14. 사고데이터를 이용한 위험지수 산정결과

구분	비교 1안의 위험지수	비교 2안의 위험지수	비교1안과 2안의 차이 (비교1안/2안)
설문조사 결과	1008	608	1.658배
사고데이터 결과	138	86	1.604배

본 연구에서 제시하는 정성적 및 정량적 위험도분석 결과의 이용 방안은 다음과 같다. 본 연구의 경우 정량적 교통사고 데이터를 충분히 이용하였으므로 아래 1번 방안과 같이 정성적인 결과를 정량적인 결과의 검증으로 사용하였다.

① 신뢰할 수 있는 정량적 분석 자료를 구할 수 있는 경우에는 정성적 위험도 분석의 결과는 정량적 분석을 위한 검증으로 사용

② 소수의 정량적 데이터만을 구할 수 있는 경우에는 정성적 위험도분석 결과와 가중치를 동일하게 적용하여 분석

③ 정량적 데이터를 전혀 수집할 수 없는 경우에는 정성적 위험도 분석 결과 값 이용

5. 위험도분석 결과의 활용

본 논문에서 제안하는 위험도 분석 방법은 가치공학 측면의 성능평가 항목 중 사고위험성에 대한 정성적인 기준 뿐만 아니라 정량적인 분석 기준을 제공할 수 있다. 또한 위험도 분석결과를 VE 평가등급으로 활용하기 위하여 VE의 성능항목점수로 변환하기 위한 척도를 다음 표 15와 같이 제안되었다. 위험도분석 결과 위험지수가 높을수록 위험도는 큰 것을 의미하므로 가치공학 기법에 안전성 평가등급은 이에 역순으로 산정중요도가 all Low인 경우 46 점과, all High인 경우 220 점을 사고안전성에 대한 VE 성능평가등급 10단계로 구분하여 다음과 같은 정량적인 위험지수 변환표로 나타내었다.

표 15. 위험지수 변환표

등급	척도	비고
VE 안전성	위험지수	
10	46~64.4	all Low
9	64.4~82.8	
8	82.8~101.2	
7	101.2~119.6	
6	119.6~138	
5	138~156.4	
4	156.4~174.8	
3	174.8~193.2	
2	193.2~211.6	
1	211.6~230	all High

이러한 위험지수 변환표를 토대로 결과 값을 VE에 대한 안정성 평가 등급으로 환산한 결과가 표 16과 같다. 다음 표 16에서 보는 바와 같이 비교 1안 과 비교 2안 각각의 VE성능평가 점수가 5점과 8점으로 평가되었으며, 이는 정량적 위험도평가를 기준으로 평가된 사고위험성평가항목은 비교 1안에 비해 비교 2안이 월등히 안전하게 평가되었음을 의미한다.

표 16. 사고데이터를 이용한 위험지수 산정결과

구분	비교1안 (140cm)	비교2안 (127cm)
위험지수	138	86
VE 평가 점수	5	8

6. 결론

고속도로 교통안전시설은 경제성과 더불어 이용자의 안전성과 쾌적한 사용여건 유지가 필수적이다. 이를 위해 설계초기부터 구조적 안전성과 사고위험도를 고려한 안전성 확보를 통해 가치향상을 고려해야 하지만 제한된 예산범위로 인해 최적가치를 도모하고 있지 못하는 현실이다. 본 논문에서는 이러한 한계를 감안하여 국내에서는 처음으로 교통안전시설의 안전성에 관한 정성적 및 정량적 위험도분석을 수행하여 가치공학(Value Engineering)적 접근이 가능한 방법론 및 절차를 개발하였으며, 향후 정성적 및 정량적 위험도분석을 체계적으로 VE프로세스에 도입할 수 있게 하여 보다 신뢰성 있는 VE평가를 가능하게 하였다는데 큰 의의가 있다.

본 연구의 결론을 요약정리하면 다음과 같다.

· 교통안전시설물에 관한 체계적이고 실용적인 위험도분석 절차를 제안하였으며 이를 가치공학적 방법과 접목할 수 있는 방안을 제시하였다.

· 위험도분석 방법과 가치공학적 방법을 접목하는 연구는 국내에서는 선두적 연구이며 이를 실제 교통안전시설물에 효과적으로 적용한 연구이므로 관련 연구에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

· 위험도 분석 시 정성적으로만 이루어졌던 사고 위험도 분석을 정량적 분석이 가능하도록 사고데이터 및 EPDO를 이용하여 사고빈도와 피해정도 및 사고요인별로 Event Tree를 작성하여 제시하였다.

· 사고데이터분석을 통한 위험도 분석결과를 VE성능평가에 도입할 수 있도록 EPDO값을 등급평가기준으로 변환하기 위한 정량적 척도를 제시하였으며, 이를 이용하여 중앙분리대 비교 1안(140cm) 및 비교 2안(127cm)에 대한 위험지수를 산정하였다.

· 비교 1안 및 비교 2안의 위험지수 평가 결과 각각 1008 vs 608 및 138 vs 86으로 나타났으며 비교안의 차이에서 각각 1.658배와 1.604배로 정성적 및 정량적 분석 결과 서로 다른 두 가지 경우의 분석이 비슷한 차이를 보임을 알 수 있다.

· 위험지수 변환표를 토대로 결과 값을 VE에 대한 안정성 평가 등급으로 환산한 결과 비교 1안과 비교 2안 각각의 VE성능평가 점수가 5점과 8점으로 평가되었으며, 이는 정량적 위험도평가를 기준으로 평가된 사고위험성평가항목은 비교 1안에 비해 비교 2안이 월등히 안전하게 평가되었음을 의미한다.

참고문헌

1. 개선된 콘리리트 중앙분리대의 시공결과 추적조사에 의한 최적화연구, 2000.06 한국도로공사 도로연구소
2. 원제무, 최재성 (2001), "교통공학", 박영사
3. 한국도로공사 (1998 ~ 2006), 교통사고 속보자료
4. 한국도로공사 (2006), 고속도로 교통안전시설물의 적정성 평가를 위한 가치공학적 기법 개발.
5. Dell' Isola, A. (1997). "Value Engineering: Practical Applications." RSMeans.
6. Government Asset Management Committee, (2000), "Risk Management Guideline"
7. Hiroshi Wada (2002), "Safety analysis methods and applications at the design stage of new product

development-Introducing the FMFEA and S-H Matrix Method", ESPEC Technology Report No. 10.
8. Transportation Research Board (2005), Value Engineering Application in Transportation - A synthesis of Highway Practice, NCHRP syn352.

논문제출일: 2007.04.06
심사완료일: 2007.06.08

Abstract

Risk elements of highway safety facilities are affected by complex environments. Thus, risk-based approach for traffic safety facilities is needed. For this, in this study, qualitative and quantitative risk assessment methodology and procedure for highway safety facilities is proposed, which can be used as risk-based approach incorporating VE process. Also, for the quantitative risk assessment, event tree using EPDO(Equivalent Property Damage Only) with respect to frequency and magnitude of risk events is introduced. As a result, risk index of alternative 1(140cm) and 2(127(cm) which can be used as performance factor in VE approach are estimated.

Keywords : Qualitative Risk Assessment, Quantitative Risk Assessment, Safety Facility, Medium Barrier, Risk Index

<첨부 1 - 전체 교통사고 분석결과 종합>

구 분			140cm 중앙분리대		127cm 중앙분리대	
분석 구간	분석	방 법	합계	1년 평균	합계	1년 평균
경부고속도로 비상활주로 구간	사고율 분석	사고건수법	13	3.5	4	1.8
		사고율법	0.0249		0.0092	
		사고건수-율법	0.0249		0.0092	
	사고심각도 분석	사고1건당 EPDO(SI)	37.4	10.0	5.5	2.7
		사고1건당 사고비용(만원)	52,1409.6	18,231.29	1,484.65	733.47
중앙고속도로	사고율 분석	사고건수법	82	20.5	9	3.0
		사고율법	0.0122		0.0050	
		사고건수-율법	0.0605		0.0152	
	사고심각도 분석	사고1건당 EPDO(SI)	11.2	3.0	4	1.3
		사고1건당 사고비용(만원)	6,039.80	1,671.00	733.22	244.41
서울외곽순환도로	사고율 분석	사고건수법	69	17.3	8	2.7
		사고율법	0.0018		0.0011	
		사고건수-율법	0.0090		0.0034	
	사고심각도 분석	사고1건당 EPDO(SI)	9.9	2.4	3.5	1.4
		사고1건당 사고비용(만원)	6,702.19	1,514.07	824.83	261.21

<첨부 2 - 위험지수 산정 과정>

❖ 위험등급에 대한 위험지수 산정표
- 산정된 위험등급을 정량적으로 변화하기 위하여 각 위험등급 별 점수 부여

위험등급	High	Medium	Low
위험지수	X_1 point	X_2 point	X_3 point

❖ 위험지수 산정 결과 예

구분	비교1안		비교2안	
위험등급	High	A	High	A'
	Medium	B	Medium	B'
	Low	C	Low	C'
위험지수 (Risk Index)	$(A\times X_1 + B\times X_2 + C\times X_3) = RI_1$		$(A'\times X_1 + B'\times X_2 + C'\times X_3) = RI_2$	
선정				

각 위험지수(RI) 값이 정량적 위험도를 나타냄

$RI_1 < RI_2$: 비교1안 선정
$RI_1 > RI_2$: 비교2안 선정

❖ VE 평가 항목중 안전성 평가를 위한 위험지수 변환표

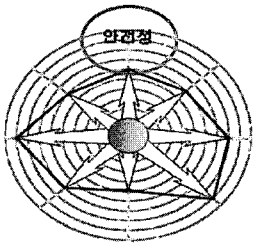
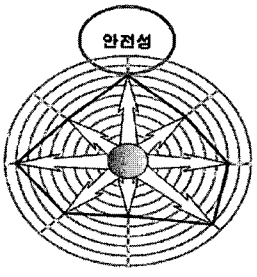
등급	척도	비고
VE 안전성	비교안 위험지수	
10	$RI_1 \sim RI_2$	all Low
9	$RI_2 \sim RI_3$	
⋮	⋮	⋮
2	$RI_{n-2} \sim RI_{n-1}$	
1	$RI_{n-1} \sim RI_n$	all High

도로사고의 위험등급별 위험점수 (예 X_1)를 All Low로 부여한 경우

Caltrans기준에 맞게 VE 안전성 등급을 10등급으로 세분화

도로사고의 위험등급별 위험점수 (예 X_3)를 All High로 부여한 경우

여기서 RI_1 = 위험사고건수 × X_3
$RI_2 = RI_1 + (RI_n - RI_1) / 10$
⋮
RI_n = 위험사고건수 × X_1

❖ 위험도 접근방식에 의한 위험요소 사건중요도 산정 예

구분	비교 1안	비교 2안
위험지수	$(A\times X_1 + B\times X_2 + C\times X_3) = RI_1$	$(A'\times X_1 + B'\times X_2 + C'\times X_3) = RI_2$
안전성 등급	A등급	B등급
VE 평가 다이어그램