

국내 고속도로 교량의 차량 충돌 위험도 평가

민근형¹, 김우석^{2*}, 조준상³, 길홍배⁴

Vehicular Collision Risk Assessment on the Highway Bridges in South Korea

Geun-Hyung Min¹, Woo-Seok Kim^{2*}, Jun-Sang Cho³, Heung-Bae Gil⁴

Abstract: Vehicle collision to bridges has been known as one of the causes of bridge collapse, and the emergency plans and disaster management has been recently emphasized to secure public safety. This study conducted risk assessment of vehicular collision to bridges for highway bridges in Korea. Risk assessment consists of three steps; preliminary risk analysis(PRA), simplified risk analysis(SRA) and detailed risk analysis(DRA). The PRA firstly screens out the possibility of occurrence of the event. The SRA identifies influential factors to risk of the event and evaluates risk scores to determine risk levels and necessity of DRA that investigates the risk of the bridge in detail. This study focuses on the methodology of the risk assessment, especially the SRA, and the stratification methods which evaluate risk levels of vehicular collision. The analysis results were compared to the reported vehicular collision accidents. The proposed method can be utilized in similar disaster management area.

Keywords: Bridge, Risk assessment, Maintenance, Vehicular collision

1. 서 론

지난 수십 년간 각종 재해로 인하여, 적지 않은 고속도로 교량의 붕괴가 발생하였으며, 이는 사회적, 경제적으로 많은 비용을 요구할 뿐 아니라 인적 피해와 교통흐름에 영향을 미치게 된다. 미국교통부는 인적 및 자연재해의 잠재적 위협에 대응하기 위해 비상 관리 계획 수립의 필요성을 제시하였다(Bai and Burkett, 2006). 또한 국내에서도 막대한 피해를 가져오는 재난을 예방하고 인적 및 자연 재난 발생 시 피해를 최소화할 수 있도록 재난관리시스템 구축 방안을 모색하고 있다(Kim, 2008). 특히 Barker and Puckett(1997)은 (1) 교량은 시스템의 용량을 조절, (2) 길이당 비용이 가장 높음, 그리고 (3) 교량이 붕괴된다면, 교통네트워크도 붕괴되는 이유로 인해 교통 네트워크 중 가장 중요한 구성요소를 고속도로 교량으로 선정하였다. 따라서, 교량의 붕괴를 예방하기 위한 유지관리 방법이 필요한 실정이다.

미국 뉴욕 교통국(NYS DOT)에서 1987년부터 2011까지 조

사한 교량 붕괴 사례에서는 홍수, 세굴과 같은 수문학적으로 인한 붕괴가 48건(52.17%)으로 1위였으며, 차량, 선박과 같은 충돌로 인한 붕괴가 18건(19.57%)으로 2위로 조사되었다(Cook et al., 2013). 미국의 경우 하상교량이 많은 것을 고려할 때 이는 국내의 실정과는 상이할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 차량의 교량 충돌에 대한 위험도 분석을 하고자 한다.

본 논문에서는 고속도로 교량 재난발생 분석 및 긴급복구 방안 연구를 수행함에 있어, 교량 붕괴에 영향을 미치는 인적 재해인 충돌에서 차량 충돌(Vehicle Collision)에 대한 인자를 조사하였다. 또한, 차량 충돌의 사례를 확인하고 확률분석 및 시뮬레이션 기법 등을 활용하여 차량 충돌에 대해 현재 공용 중인 8425개소의 국내의 고속도로 교량의 위험도 분석을 수행하였다. 또한, 위험도 분석 결과를 실제 사례와 비교하여 차량 충돌의 위험도 분석에 적절한 급간 분류법을 선정하고자 하였다.

2. 위험군 분류 방법론에 대한 문헌 고찰

2.1 위험 기반 방법론(Risk-Based Methodology)

한국도로공사(2013)는 위험 기반 방법론은 구조물에 물리적 피해를 일으킬 수 있는 근원(Hazard)을 정의하고 피해의 가능성과 심각성을 측정하기 위하여 가용한 정보를 체계적으로 활용하여 위험 평가(Risk Assessment)를 수행하고, 이를 기

¹학생회원, 충남대학교 토목공학과 석사과정

²정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

³정회원, 도로교통연구원 책임연구원

⁴정회원, 도로교통연구원 수석연구원

*Corresponding author: wooseok@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University

•본 논문에 대한 토의를 2016년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

반으로 위험 대응책 및 복구 전략을 제시하는 접근법이라고 정의하고 있다.

Cremona et al.(2012)은 위험 요소 및 취약성, 중요도를 선정하여 위험군 분류를 실시하였으며 방법론은 Fig. 1과 같이 세 가지 단계로 구성된다.

첫 번째 단계는 구조물에 영향을 끼치는 위험요소 및 취약성, 중요도의 식별이다. 위험요소의 식별은 조사 기간 동안의 발생 가능성 및 위험요소의 강도 등의 특성이다.

두 번째 단계에서는 기본위험분석을 실시한다. 먼저 위험요소 식별과 취약성을 동시에 고려하여 심각도 매트릭스(Criticality matrix)를 작성하여 위험군 등급을 분류한다. 그 다음 심각도(Criticality) 등급과 교량의 중요도를 동시에 고려하여 최종 위험군 분류를 수행한다. 최종 위험군 분류에서 낮음(Low) 단계에 속한 구조물은 주기적인 점검을 진행하며, 보통(Medium) 단계에 속한 구조물은 추가적인 조사를 통해, 위험요소 및 취약성을 향상시킨 후, 낮음(Low) 단계와 마찬가지로 주기적인 점검을 실시한다.

세 번째 단계는 최종 위험군 분류에서 높음(High) 단계에 속한 구조물에 상세위험분석을 수행하여 복구 및 대응책을 제시한다.

한국도로공사(2013)는 교량의 화재에 의한 피해를 예방하고, 이로 인한 위험도를 관리하기 위하여 위험 기반 방법론을 통해 국내 고속도로에 위치한 교량을 대상으로 화재위험도 평가 방법을 제안하였다. 평가 방법으로는 교량의 화재사고 발생가능성을 확인하는 예비위험분석(Preliminary Risk Analysis, PRA), 체크리스트를 기반으로 교량의 화재위험도를 평가하는 기본위험분석(Simplified Risk Analysis, SRA), 기본위험분석 결과를 기초로 교량의 화재 위험도 수준이 높은 경우 실시하는 상세위험분석(Detailed Risk Analysis, DRA)의 세 단계의 과정으로 이루어진다.

먼저 PRA 단계에서는 스크리닝 작업을 통해, 화재 위험도 평가의 필요 여부를 정하게 되며, 두 번째 SRA 단계는 PRA 단계에서 위험도 평가가 필요하다고 분류된 교량에 대해서 위험도 분석을 실시하였으며, 위험도 분석 단계는 화재의 발생가능성(Occurrence), 취약성(Vulnerability), 교량의 중요도(Importance) 관점으로 접근하였다. 발생가능성의 항목으로

는 하부도로 종류, 환경조건, 교량하부 조건으로 가정하였다. 화재에 대한 취약성은 교량에 적용된 주요 재료, 경간 특성, 유지관리 상태, 설계하중을 고려하여 교량하부에서 발생하는 대형화재에 대해 평가하였으며, 교량의 중요도는 교량이 가지는 사회적, 경제적 중요도로 평가한다.

3. 위험도 분석 방법

기존 문헌을 통해 각각의 장단점을 분석하여 국내 교량의 위험도 분석에 적합한 위험도 평가 방법을 Fig. 2와 같이 PRA, SRA, DRA의 세 단계로 제안하였다. 이는 Fig. 1의 Criticality Matrix를 설정하지 않고 발생가능성, 취약성, 중요도의 인자를 모두 동시에 고려하여 위험도 등급을 결정하는 방식을 사용하였다.

첫 번째 단계인 PRA 단계에서는 재난별로 스크리닝(Screening) 작업을 실시하여 위험도 분석의 필요 유무를 판단한다. 예를 들어 교량이 하천을 통과하면 선박에 의한 충돌을 고려해야 한다. 그러나 하천의 규모가 작아 선박 통행에 제한이 있다면 합리적인 위험도 분석이 아닐 것이다. 따라서 PRA 단계에 위험도 분석에 적절한 인자들을 선정하여 수행한다면 시간적-경제적으로 많은 도움이 될 것이다.

두 번째 단계인 SRA 단계에서는 PRA 단계에서 위험도 분석이 필요한 교량에 대하여 위험도 분석을 실시한다. SRA 단계는 충돌의 발생가능성(Occurrence), 충돌 발생 시 교량의 취약성(Vulnerability), 교량의 중요도(Importance)에 대해 선정된 인자들을 통해 위험도 분석을 수행하게 되며 Kodur and Naser(2013)가 제안한 가중치 산정 방법론을 적용하여 최종 위험도 점수를 산정한다. 최종 위험도 점수는 각 교량의 각 항목(발생가능성, 취약성, 중요도)별 점수와 항목의 최대 점수의 비를 계산하고, 각 항목별 가중치를 곱한 후에 합한다. 산정된 최종 위험도 점수는 다시 각 급간 분류법을 이용하여 Low Risk(RL), Moderate Risk(RM), High Risk(RH) 세 등급

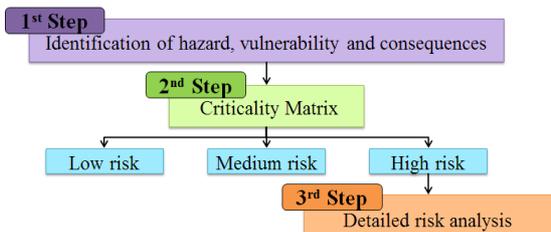


Fig. 1 Procedure of Risk-Based Methodology

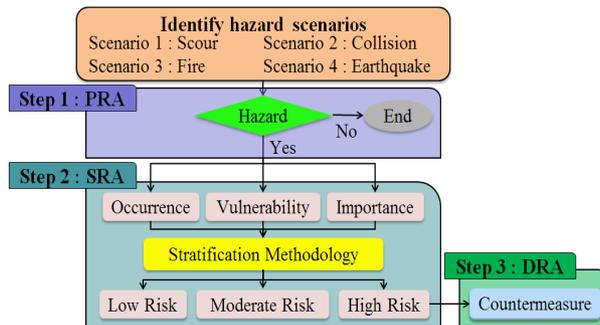


Fig. 2 Risk Assessment Procedure

으로 분류하여 최종 위험도 등급으로 나타낸다.

세 번째 DRA 단계는 SRA 단계에서 위험도 등급이 RH가 나온 교량에 한해서 위험도 등급을 하향시키는 단계이다. 충돌의 발생가능성과 취약성을 보완하기 위해 해당 교량의 교량관리 데이터베이스, 정밀 시뮬레이션 해석, 개선 가능성 등의 절차를 수행하여 위험도 등급을 하향시킨다. 다양한 절차를 통해 보완된 교량은 위험도 등급을 재평가 하게 된다.

3.1 위험등급 급간 결정 방법

위험도 분류에서 핵심 중 하나는 급간을 분류하는 것이다. 급간이 적절하게 결정된다면 좀 더 신뢰성이 높은 결과를 도출할 것이다. 즉, 급간 분류는 어느 정도의 수준을 좋음, 보통, 나쁨의 구간으로 설정할 것인지를 결정하는 방법이다. 급간을 결정하는 방법은 연구의 목적과 데이터의 종류 및 형태에 따라 적절한 구분법을 선정하여 사용하여야 한다. 본 연구에서는 충돌 위험도 분석 수행에 급간을 분류하기 위하여 Lee et al.(2006)의 논문으로 부터 자연적 구분법(Natural Break based Interval, NBI), 등간격법(Equal Interval, EI), 표준편차법(Standard Deviation based Interval, SDI)과 이전의 한국도로공사(2013)에서 사용한 신뢰도법(Reliability based Interval, RI) 총 4가지 분류법을 사용하였으며 각 인자를 3등급으로 나누어 1~3점을 부여하였다.

자연적 구분법은 Jenks의 최적화 방법이라고도 불리며, 기본개념은 그룹 내에서의 자료배열의 동질성과 그룹 간에서의 이질성을 최대화하여 그룹화하는 것이며, 자연적 구분법의 최대 장점은 원하는 등급의 수에 따라서 최적의 등급구간의 경계를 설정할 수 있다는 점이다. 자연적 구분법은 다음의 절차로 설명된다.

1) 식 (1)과 같이 전체 자료집단의 평균값(\bar{X})을 산출하고, 각 관측치들이 평균으로부터 얼마나 분산되어 있는가를 계산한다.

$$SDAM = \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (1)$$

2) 등급구간을 설정한 후 각 등급구간의 평균(Z)을 구한 후 식 (2)와 같이 각 등급구간에 속한 관측치들이 그 구간의 평균으로부터 얼마나 분산되어 있는가를 산출한 후 전체 분산의 합을 구한다.

$$SDCM = \sum \sum (X_i - \bar{Z})^2 \quad (2)$$

3) 위 식들을 통해 식 (3)과 같이 Goodness of Variance Fit

(GVF)을 산출한다.

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM} \quad (3)$$

GVF의 범위는 0~1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 최적화된 결과값을 의미한다. 따라서 등급구간을 변화시키면서 각각의 GVF값을 확인하여야 한다.

등간격법은 자료의 구간을 같은 간격으로 나누는 분류법으로, 가장 일반적이고 널리 쓰이는 방법이다. 본 연구에서는 각 인자별 위험도 점수를 1~3점으로 정의하였으며, 자료의 크기를 3등급으로 분류하여 점수를 산정하였다.

표준편차법은 자료의 형태가 정규분포를 이루고 있을 경우 가장 이상적이며, 평균과 표준편차를 산출한 후 평균값을 기준으로 \pm 표준편차(σ)에 의해 급간을 선정하게 된다. 본 연구에서는 평균값과 $+2\sigma$ 를 기준으로 급간을 분류하여 점수를 부여하였으며, 1점은 평균값 이내, 3점은 평균값 $+2\sigma$ 이상, 그 사이는 2점으로 정의하였다.

신뢰도법은 최근 개정된 도로교 설계기준(2012)에서 정의된 목표 신뢰도 점수를 기준으로 산정하였다. 신뢰도 지수를 이용한 교량의 파괴 확률은 $P_f = \Phi(-\beta)$ 로 나타내며 β 값이 클수록 교량의 파괴 확률은 작아진다. 여기서, Φ 는 표준정규 분포의 누적분포 함수이며, β 는 파괴확률 P_f 에 대응되는 누적표준정규분포에서의 표준편차를 나타낸다. 국내 도로교 설계기준(2012)의 극한한계상태는 $\beta=3.7$ 로 제시되어 있으며, 사용한계상태는 $\beta=1.3$ 로 제시되어 있다. 본 연구에서는 이를 활용하여, β 값이 1.3 이하인 경우 1점, 3.7 이상은 3점, 그 사이는 2점으로 정의하였다.

3.2 예비위험분석(PRA) 인자

PRA 단계에서는 교량에 대하여 차량 충돌 발생가능성을 확인하여 위험도 분석이 필요한가를 확인하는 단계이다. 본 연구에서는 PRA 인자를 Table 1과 같이 선정하여 PRA를 통해 SRA 단계가 필요한 교량을 먼저 선정하였다.

3.2.1 VP-1 : 하부 도로 유무

차량 충돌에 의한 교량의 붕괴는 충돌로 인한 교각의 붕괴와 상부 구조물의 전도로 발생한다. 따라서 본 연구에서는 하부에 도로가 있는 교량에 대하여 SRA 단계를 실시하였다.

Table 1 Vehicle Collision PRA Factor

VP-1	Bridges located above road
VP-2	Pier close to the roadway within 9 m
VP-3	Vehicle Collision Prevention Facility

3.2.2 VP-2 : 도로 부근 9 m 이내 교각 유무

AASHTO LRFD(2012)에는 발주자가 현장 조건을 결정하지 않는다면, 교대와 교각의 위치는 도로의 가장자리에서부터 9 m 이내에 있는 경우의 충돌사고만 조사하도록 제시되어 있다. 도로 부근 9 m 이내에 있는 교각이 중차량과 충돌하는 연간 빈도수는 식 (4)와 같이 계산된다.

$$AF_{HBP} = 2 \times (ADTT) \times (P_{HBP}) \times 365 \quad (4)$$

여기서, ADTT는 한 방향 일일트럭교통량, PHBP는 중차량과 교각의 충돌 확률이다. ADTT는 평균일교통량(ADT)으로부터 결정할 수 있으며, 중차량이 교각과 충돌하는 확률은 AASHTO 표 3.6.5.1.1에 제시되어 있다. 따라서, AASHTO LRFD(2012)에 제시되어있는 내용을 기초로 각 교량의 설계도면을 통해 교각이 도로와 9 m 이내에 위치한 여부를 확인하여 PRA를 진행하였다.

3.2.3 VP-3 : 충돌방지시설 설치 여부

충돌방지시설은 차량이 주행 중에 주행차로를 벗어나 도로상의 구조물과의 충돌을 방지하기 위한 보호시설이다. 따라서 충돌방지시설이 설치되어 있으면 충돌에 의한 붕괴가 발생하지 않다고 가정할 수 있으며 이는 PRA 단계에서 검토가 가능하다. 또한 최근 개정된 도로교 설계기준(2012)에서 차량충돌하중에 대한 내용이 상세하게 규정되었으며, 구조물이 아래와 같이 충돌로부터 보호된 경우 차량충돌하중을 적용시킬 필요가 없다고 제시되어 있다.

- 제방
- 구조적으로 독립되어 있으며, 1,370 mm 높이의 방호벽이 구조물로부터 3,000 mm 이내에 있는 경우
- 1,070 mm 높이의 방호벽이 구조물로부터 3,000 mm 이상 떨어져 있는 경우

따라서 충돌방지시설이 설치되어있지 않은 교량에 대하여 SRA 단계를 실시하였다.

3.3 기본위험분석(SRA)의 발생가능성 인자

PRA 단계에서 충돌이 일어날 가능성이 있는 교량을 선정하여도 발생 가능성은 교량마다 다를 것이다. 따라서 발생 가능성 인자를 선별하여 점수를 부여하였다.

3.3.1 VO-1 : 하부 도로등급

차량의 충돌로 인한 붕괴는 교량 하부에서 교각과의 충돌로 인한 붕괴와 상부구조와의 충돌로 인한 전도로 발생한다.

또한 승용차와 같은 중소형차량의 경우 교각과의 충돌이 발생하여도 교각에서 발생하는 사례는 드물며 상부구조와의 충돌은 일어나지 않는다. 국외의 사례의 대부분 대형차량의 충돌로 교각 및 상부 구조물이 붕괴된다(Sharma et al., 2012). 도로교통공단의 “2014 교통사고 통계분석”에서 조사한 도로종류별 화물차 사고 빈도를 기준으로 위험도 분석을 수행하였다. Table 2에 나타나듯이, 특별광역시도에서 화물차 사고 건수가 8,095건으로 가장 크게 나타났으며, 시도가 7,768건으로 그 뒤를 이었다. 따라서 Table 3과 같이 특별광역시도, 시도를 3점으로 부여하며, 일반국도, 지방도는 2점, 군도, 고속국도, 기타는 1점으로 부여 하였다.

3.4 기본위험분석(SRA)의 취약성 인자

취약성은 차량 충돌이 발생 할 경우 교량의 취약한 정도를 나타낸다. 공용년수(VV-1)와 안전등급(VV-2), 설계하중(VV-3)은 교량의 구조적인 성능 및 상태를 나타내는 간접적인 지표이며 교각 당 기둥의 개수(VV-4), 교각 기둥의 지름(VV-5), 교량의 통과 높이(VV-6), 가로보 간격(VV-7)은 교량에 대한

Table 2 The number of Truck Accident(ROTA, 2014)

Road type	Highway	County road	Etc.	Local road	Route	City road	Metropolitan road
Accidents	744	1,512	2,266	3,463	3,802	7,768	8,095

Table 3 Vehicle Collision Occurrence factor

VO-1	Road type under the Bridge	Highway, County road, Railway, Etc.	Route, Local road	Metropolitan road, City road
		1 point	2 point	3 point

Table 4 Vehicle Collision Vulnerability Factor

Name	Factor	Stratification Methodology	Range and Score		
			1	2	3
VV-1	Bridge Age(year)		<10	≥10, <25	≥25
VV-2	Safety Level		A	B	≤C
VV-3	Design Live Load		KL-510	DB24	DB18
VV-4	No. of Columns per Pier (EA)	NBI	≥8	≥3, <8	<3
		EI	≥2	≥1, <2	1
		SDI	≥3	≥1, <3	1
		RI	≥4	≥2, <4	2
VV-5	Min. Pier Column Diameter(m)		≥1.6	≥1.2, <1.6	<1.2
VV-6	Bridge Clearance Height(m)		≥10	≥5, <10	<5
VV-7	Crossbeam Spacing		<3	≥3, <6	≥6

특성을 나타낸다. 기존 연구 및 자료를 통하여 기준별 상태나 능력이 제시되어있는 인자에 대해서는 문헌을 이용하여 급간을 선정하였으며 기준이 없는 경우에는 공용중인 고속도로 교량의 인자별 자료를 취합하여 앞에서 선정된 4가지 급간분류법의 급간 결정 방법을 통하여 Table 4와 같이 급간별 점수를 부여하였다. 본 연구에서 교각 형식은 종류와 형식이 다양하여 단순한 계산을 위해 배제하였다.

3.4.1 VV-1 : 공용년수

교량은 수십여 년 간 건설되어 사용되어지고 있으나, 열화현상, 환경적 영향(크리프, 부식) 피로, 기상조건 등 다양한 인자들에 의하여 내구성이 떨어지게 된다(Kodur, 2013). 본 연구에서는 교량의 상태등급은 시설안전공단의 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”에서 제시되어 있는 자료와 현재의 도공사 유지관리 목표에 따라, A등급은 10년 이하, B등급은 11~25년 이하, C등급은 26~40년에 부합하는 것으로 간주하였다. 이를 기초로 국내 교량의 공용년수를 통해 위험도 평가를 수행하였다.

3.4.2 VV-2 : 상태등급

교량의 상태등급은 정밀점검 및 정밀안전진단을 실시하여 교량의 상태평가를 나타내는 지표이다. 상태등급은 일반적으로 재료시험, 외관조사, 구조해석 및 부재별 상태평가 등을 통해 구조물의 안전성 및 부재의 내하력을 종합적으로 검토한다. 대체적으로 공용연수에 따라 상태등급이 하락하게 되지만, 유지관리의 정도나 시공결함의 정도에 따라서 교량별로 상이한 안전등급을 나타낼 수 있다. 따라서 상태등급은 구조물의 건전도를 보여주는 척도이며 교량의 상태에 따라 A~E 등급을 부여하게 된다. 국내 교량의 상태등급 분류는 한국시설안전공단(2010)의 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침’에 따라 정의하였으며, 이를 고려하여 위험도 평가를 수행하였다.

3.4.3 VV-3 : 설계하중

하중의 강도는 구조부재의 성능에 영향을 미치는 인자 중 하나이다. 예를 들어 교량의 설계 시 교량에 작용하는 활하중의 크기를 통해 구조설계를 진행한다. 이는 설계활하중의 크기가 증가될수록 교량이 견딜 수 있는 구조적 성능의 크기가 증가됨을 뜻하며 이에 교량의 설계활하중이 클수록 취약성에서 유리한 점수를 부여하였다. 최근 개정된 도로교 설계기준(2012)에 도입된 KL-510 표준트럭하중은 총 510 kN이며, 이전 도로교 설계기준(2010)의 활하중은 DB-13.5(432 kN), DB-18(324 kN), DB-24(243 kN)으로 분류된다. 따라서 Table 4와 같이 설계활하중의 크기를 기준으로 점수를 부여하였다.

3.4.4 VV-4 : 교각 당 기둥의 개수

차량충돌로 교각이 손상을 입거나 붕괴되었을 경우 상부 구조의 과도한 처짐 등에 의하여 추가 피해가 발생한다. 그러나 교각에 기둥이 다수인 경우에는 하중 분할로 인하여 구조물의 즉시 붕괴는 발생하지 않을 가능성이 있기 때문에 기둥의 개수가 다수인 경우 기둥의 개수가 하나인 경우에 비해 위험도가 낮게 평가 될 수 있다. 따라서 기둥의 개수에 따라 급간을 정하여 분석을 실시하였다.

3.4.5 VV-5 : 교각 기둥의 지름

Sharma et al.(2014)는 RC 기둥에 차량충돌하중을 재하하여, AASHTO LRFD의 기준을 비교 분석하였다. AASHTO LRFD에서는 차량 충격하중을 일정한 전단력으로 가정한다. 그러나 실제로는 차량의 속도 및 질량 등 다양한 변수에 의해 불규칙한 전단력을 보이는 것을 확인하였으며, 주요 변수의 하나로 교각의 세장비를 선정하였다.

Lee et al.(2015)에서 사용된 방법을 사용하였다. 트럭모델은 10 ton, 16 ton, 38 ton을 사용하였으며 교각은 직경 1.2 m, 높이 7.1 m이며 Fig. 3과 같이 교각의 경계조건에 따라 모델을 구성하여 해석을 실시하였다. 해석 결과를 ASCE(1997)에서 제시한 철근콘크리트 응답기준을 기준으로하여 파괴정도를 구분하였으며 16 ton 이상의 트럭이 직경 1,200 mm, 높이 7,100 mm의 교각에 충돌 할 경우 붕괴 또는 구조건전성을 저해할 가능성이 있는 것으로 검토되었다. 따라서 본 연구에서는 지름이 1,200 mm 미만인 경우 3점으로 부여하였으며 1,600 mm 이상인 경우 1점으로 부여하였다. 그사이의 경우는 2점으로 부여하였다.

3.4.6 VV-6 : 교량 통과높이

최근 국외의 차량 충돌 사고 사례를 보면 교량의 통과 높이보다 높은 트럭의 통행으로 상부구조물과의 충돌이 빈번하게 발생한다(Sharma et al., 2008). 미국의 교차로에서의 충돌사

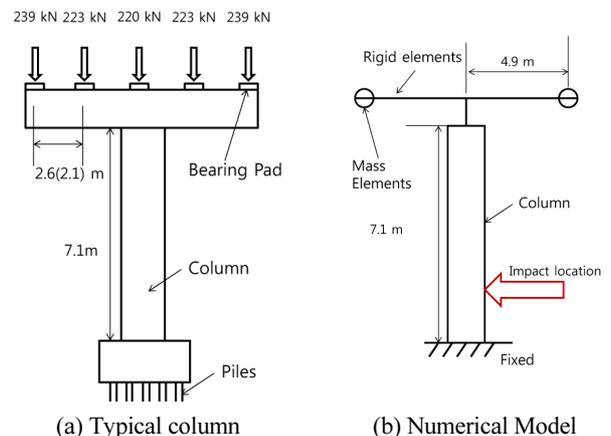


Fig. 3 Boundary Condition and Numerical Model(Lee et al., 2015)

고 중 61%는 Over-height trucks에 의해 발생되었으며 이는 교량의 전체 충돌 사고중 14%에 해당되는 수치이다(Xu et al., 2012). 또한 중국 베이징의 고가도로의 사고 중 차량과 교량의 충돌이 50%이며, 이 중 대략 20%의 사고가 Over-height 차량에 의해 발생되었으며 국내의 충돌 사례에서도 Over-height 차량의 충돌로 교량이 피해를 입는 경우가 많다. 도로교 설계 기준(2012)에서는 도로 수직여유공간은 5.0 m 이상 확보해야 한다고 제시하고 있다. 따라서 교량의 통과 높이를 5.0 m와 그 기준의 2배인 10.0 m를 기준으로 점수를 부여하였다.

3.4.7 VV-7 : 가로보 간격

교량 통과 높이 인자에서 언급한바와 같이 Over-height 차량과 교량의 상부구조와의 충돌이 빈번하게 발생한다. 이러한 차량 충돌 하중은 횡방향으로 작용하며 상부구조의 부재인 가로보(Cross Beam)가 부담한다. 따라서 같은 충돌하중이 발생하여도 가로보의 간격이 좁을수록 하중분담으로 구조물의 내하력이 증가 할 것이다. 본 연구에서는 도로교 설계기준(2012)에 제시되어 있는 표준트럭하중의 횡방향 폭인 3 m와 2 배인 6 m를 가로보 간격의 기준으로 점수를 부여하였다. 가로보 간격이 3 m 미만일 경우에는 2개 이상의 가로보가 하중을 부담할 것이며 6 m 이상일 경우에는 가로보가 없는 곳에서 충돌이 일어날 수 있으며 주부재인 거더가 파괴될 가능성이 높다.

3.5 기본위험분석(SRA)의 중요도 인자

교량의 중요도는 교량에 대해 유일한 값을 가지는 것으로

Table 5 Vehicle Collision Importance factor

Name	Factor	Interval	Range and Score		
			1	2	3
I-1	Traffic Volume ($\times 10^3$)	NBI	< 38	$\geq 38, < 156$	≥ 156
		EI	< 11	$\geq 11, < 26$	≥ 26
		SDI	< 28	$\geq 28, < 108$	≥ 108
		RI	< 80	$\geq 80, < 176$	≥ 176
I-2	Recovery Cost (m^2/span)	NBI	< 420	$\geq 420, < 830$	≥ 830
		EI	< 280	$\geq 280, < 460$	≥ 460
		SDI	< 410	$\geq 410, < 900$	≥ 900
		RI	< 730	$\geq 730, < 1,320$	$\geq 1,320$
I-3	Facilities Under the Bridge	No facilities		Road	Bridge or Railway
		NBI	< 1.4	$\geq 1.4, < 3.4$	≥ 3.4
I-4	Bridge Asset (million Won/ m^2)	EI	< 1.2	$\geq 1.2, < 1.6$	≥ 1.6
		SDI	< 1.5	$\geq 1.5, < 2.4$	≥ 2.4
		RI	< 2.1	$\geq 2.1, < 3.2$	≥ 3.2
I-5	Location of Bridge	-	-	-	

Table 5과 같이 교통량(I-1), 교량의 복구비용(I-2), 교량 하부 등급(I-3), 교량자산가치(I-4), 교량의 위치(I-5) 등을 선정하였으며 교량의 위치는 자료부족으로 고려하지 않았다.

3.5.1 I-1 : 교통량

교통량은 교량의 중요성을 평가하는 가장 핵심적인 요소로서 연평균 일 교통량(Annual Average Daily Traffic, AADT)으로 표현 가능하다(Kodur, 2013). AADT는 다수의 연구에서 교량의 중요도를 평가 시 필수적으로 고려되며 교량의 경제적 가치는 교통량에 비례하는 것으로 가정하였다. 따라서 국내의 각 교량별 AADT를 조사하여 교량의 중요도 평가를 수행하여야 하며 조사한 AADT를 급간 분류법을 통해 아래의 급간별로 점수를 부여하여 위험도 평가를 수행하였다.

3.5.2 I-2 : 복구비용

교통량이 많을수록 단위 길이 당 교량의 폭은 넓어질 것이다. 한국도로공사(2013)는 교량의 복구비용을 산정하기 위해서 한 개 경간의 보수 및 재시공에 관한 정보를 사용하였다. 이는 한 경간에 바닥판의 면적이 클 경우 상대적으로 보수 및 재시공 비용이 커진다고 간주하였다. 따라서 교량의 손상 및 붕괴가 발생하였을 시 교량을 복구하고 재개통을 하기 위해 필요한 비용으로 중요도를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 ‘교량 바닥판의 전체 면적 / 경간수’를 계산한 후 계산 값들에 대하여 급간분류법을 적용하여 점수를 부여하였다.

3.5.3 I-3 : 교량 하부등급

교량이 손상되거나 붕괴가 발생 할 경우 교량 하부의 교통은 사고지점을 통과하는데 평소보다 지체될 것이다. 만약 교량 하부가 고속도로 및 국도라면 사회적, 경제적 비용은 상대적으로 증가할 것이다. 대표적으로 2007년 미국 오클랜드의 I-80-880 Interchange에서 가솔린 탱크 차량의 전복으로 화재가 발생하였으며 교량의 붕괴로 통행을 차단하였다. 당국의 빠른 대응에도 불구하고 복구비용과 지역주민들에게 교통 통행료 제공 등 9000만 달러의 경제적인 손실이 발생하였다(Kodur, 2010). 따라서 교량 하부조건을 인자로 선정하여 교량 하부등급에 따라서 위험도 점수를 부여하여 분석을 수행하였다.

3.5.4 I-4 : 교량 자산 가치

교량의 손상 및 붕괴가 발생하였을 시 피해액의 크기를 통해 교량의 중요도를 나타낼 수 있다. 그러나 교량의 붕괴 시 피해액을 나타내는 직접적인 지표는 부족한 실정이다. 교량의 자산가치는 유지관리(Maintenance), 개보수(Repair, Rehabilitation), 운영(Operation) 등의 다양한 단계에서 비용을 포함한 가치를 부여

하는 절차를 포함한다. 따라서 본 연구에서는 교량의 피해액을 간접적으로 표현하기 위하여 교량의 자산 가치를 사용하였다.

4. 사고사례

본 연구에서 위험도 분석을 실시하기 전에 실제 사고사례를 조사하여 손상 및 붕괴 정도에 따라서 위험도 등급을 결정하였다. 국내의 사고사례를 중점으로 조사하였으며 사례가 부족할 경우에는 국외 사례도 포함하여야하나 국외 사례의 경우 앞에서 선정된 인자들을 선별할 수 없어 포함하지 않았다. 이는 차후 각 급간 분류법을 통해 결정되는 위험도 등급과 비교함으로써 적절한 급간 분류법을 제안하는데 중요한 역할을 한다.

국내 고속도로 교량에서 발생한 차량 충돌 사고 사례는 2건이 보고되고 있으며 Table 7에 나타내었다. 두 사례 모두 통과 높이보다 높은 차량의 통과로 발생하였다. 사고 사례의 피해 등급(Damage Level)을 기준으로 Table 7과 같이 위험도 등급을 결정하였으며 위험도 등급은 Table 6과 같다.

5. 차량 충돌 재난 위험도 분석 시뮬레이션

본 장에서는 4가지 급간 분류법을 사용하여 차량 충돌 위험도 분석을 수행하고, 실제 국내 차량 충돌 사고와 위험도 수준을 비교 및 분석하여 적절한 위험도 분석 방법을 제안한다. 또한 고속도로에 위치한 강 또는 콘크리트로 시공된 중소지간의 교량을 대상으로 위험도 분석을 수행하기 위해서 케이블 교량, 트러스 교량, 복층 교량 등은 분석 대상에서 제외하였으며 한국도로공사에서 관리 중인 총 8,425개소에 대해서 위험

Table 6 Vehicle collision Damage level

Low Damage(DL)	Secondary member damaged, minor repair is required
Moderate Damage(DM)	Primary member damaged, repair or rehabilitation is required
High Damage(DH)	Bridge failure, reconstruction is required

Table 7 Vehicle collision case in Korea

Bridge	Structure Type	Event Data	Cause of Accident	Damage	Damage Level
Geoncheon IC Overpass	STB	2013. 02.	Over-height vehicle passed under the bridge	Steel box was scratched, Stringer failure, Pier barricade failure	DM
Gamcheon Bridge	PSCI	2004. 08.	Steel Transporting Vehicle impacted the bridge	One PC Beam damage, Crossbeam failure	DM

도 분석을 수행하였다.

5.1 예비위험분석(PRA) 결과

본 연구에서 고려된 교량의 수는 총 8,425개소이며, 예비위험분석 결과 하부 도로 유무와 도로 부근 9 m 이내 교각 유무에서 만족을 하지 못하는 교량은 7,893개소로 나타났다. 또한 SRA 단계를 수행할 수 있는 교량은 532개소로 나타났다. 따라서 532개소에 대해서 기본위험분석(SRA)을 수행하였다.

5.2 기본위험분석(SRA) 결과

기본위험분석단계는 현재 획득 가능한 자료를 토대로 차량 충돌의 발생가능성(Occurrence), 취약성(Vulnerability), 교량의 중요도(Importance)의 인자를 선정하였으며, 이에 따라 4가지 급간 분류법을 사용하여 급간을 결정된 후 발생가능성 등급, 취약성 등급, 중요도 등급을 산정하였고 결과는 Figs. 4~6에 나타나 있다.

발생가능성 등급, 취약성 등급, 중요도 등급 모두 가장 높은

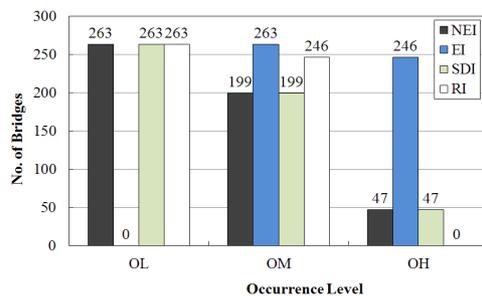


Fig. 4 Vehicle-Bridge Collision Occurrence Level

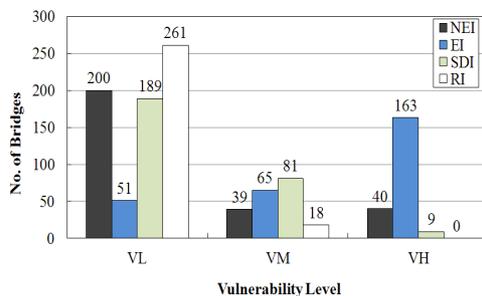


Fig. 5 Vehicle-Bridge Collision Vulnerability Level

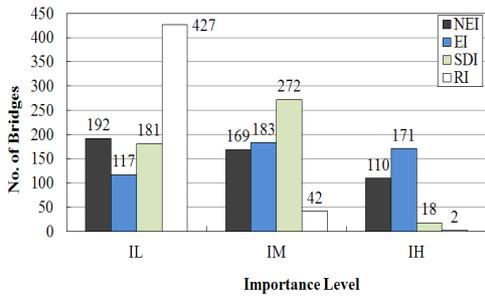


Fig. 6 Vehicle-Bridge Collision Importance Level

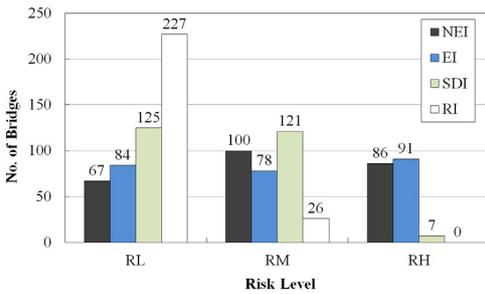


Fig. 7 Vehicle-Bridge Collision Risk Level

등급인 OH(High Occurrence), VH(High Vulnerability), IH(High Importance)의 경우 등간격법의 경우 가장 많은 교량이 포함되었고, 신뢰도법이 가장 적은 개소수를 포함하였다. 이는 각 급간분류법의 특징을 나타내고 있으므로 위험도 분석의 목적에 따라 급간분류법을 선택해야 할 것이다.

5.3 위험도 등급 결정

앞에서 급간 구분법에 의해 차량 충돌의 발생가능성, 취약성 및 교량의 중요도 점수를 산정하였다. 위험도 등급을 결정하기 위하여 3 가지 항목에 대한 점수를 정규화한 후 합산하여 나온 위험도 점수는 다시 급간분류법을 통해 Low Risk(RL), Moderate Risk(RM), High Risk(RH)로 분류하여 Fig. 7과 같이 최종 위험도 등급을 나타낸다. SRA를 실시한 532개소 교량 중에 279개소의 교량은 자료부족으로 위험도 등급에 포함되지 않았다. 고위험군인 RH등급에 포함되는 교량의 수는 자연적 구분법의 경우 86개소, 등간격법은 91개소, 표준편차법의 경우 7개소이다. 신뢰도법의 경우는 RH등급에 속하는 교량은 없는 것으로 나타났다.

5.4 위험도 등급 비교

Table 8에 급간 분류법 별 기준 위험도 점수와 건천IC 육교와 감천교의 위험도 점수를 나타내었으며 실제 피해 등급(Damage Level)과 비교를 하였다. Table 8의 L-M은 RL등급과 RM등급 경계의 기준이 되는 점수이며 M-H는 RM등급과

Table 8 Comparisons of Damage Level and Risk Level

Bridge	Damage Level	NBI	EI	SDI	RI
Geoncheon IC Overpass	DM	RM	RM	RM	RL
Gamcheon Bridge	DM	RM	RH	RM	RL

RH등급 경계의 기준이 되는 점수이다. 충돌 사례 2가지에 대해서 위험도 분석의 결과와 실제 손상등급을 비교하였습니 다. 모두 Damage Level은 DM으로 RM등급으로 나타난 자연 적 구분법과 표준편차법의 결과와 같았으며 등간격법의 결과는 건천 IC 육교가 RM등급으로 같은 등급을 나타내었다. 하지만, 수집된 차량 충돌사례의 수가 제한적이므로 이에 대한 데이터를 충분히 확보한다면 좀 더 분명한 결과를 얻는데 도움이 되리라 예측된다.

6. 결론

차량충돌에 의한 교량붕괴 위험군을 분류하기 위하여 위험도 분석을 실시하였다. 본 논문에서는 세 단계의 위험도 분석 과정을 설정하였으며, 사고발생 가능성에 대한 스크리닝(screening) 단계인 PRA와 위험도 분석이 필요한 교량에 대한 위험도 기여인자별 위험도 점수를 산정하여 위험도 등급을 선정하는 SRA에 집중하였다. 기존의 연구들을 조사하여 각각의 장단점을 통해 본 연구에 적합한 위험도 분석을 선택하였으며, 발생가능성(Occurrence), 취약성(Vulnerability), 교량의 중요도(Importance) 인자를 선정하였다. 또한 위험도 분석을 수행하는데 있어 필요한 급간의 정의는 NBI, EI, SDI, RI의 총 네 가지 분류법을 사용하였다. 네 가지 급간 분류법을 사용하여 인자별 급간을 정하여 점수를 부여 및 산정하였고 합산하여 발생가능성, 취약성 및 교량의 중요도 점수를 산정하였다. 발생가능성, 취약성 및 교량의 중요도 점수를 합산하여 나온 위험도 점수에 네 가지 급간 분류법을 사용하여 위험도 등급을 결정하였다. 그 결과 각 급간 분류법의 특징을 반영하는 결과 값이 나타났으며 실제 차량 충돌 사례와 비교를 실시하였다. 그 결과 자연적 구분법과 표준편차법은 2개소 모두 일치하였다. 차량 충돌 사례의 데이터를 충분히 확보한다면 좀 더 향상된 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 지원을 받아 수

행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

AASHTO (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units, 6th Edition. Washington, DC: AASHTO.

Bai, Y., and Burkett, W. R. (2006), Rapid Bridge Replacement: Processes, Techniques, and Needs for Improvements, *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(11), 1139-1147.

Barker, R. M., and Puckett, J. A. (1997), Design of Highway Bridges, Wiley.

Cook, W., Barr, P. J., and Halling, M. W. (2013), Bridge Failure Rate Analysis, Transportation Research Board, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, 13(1249), 1-14.

Cremona, C., Cordir, P., and Neiers, S. (2012), Application of Risk Analysis for the Preservation of Post-Tensioned Girder Bridge Decks, Bridge Maintenance, safety, management, resilience and sustainability, 2885-2892.

Kim, G. S. (2008), Model of Road Design and Location of Urban Facilities ofr the Prevention of Disasters, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, 8(3), 59-65.

Kim, J. H., Yi, N. H., Phan, D. H., Kim, S. B., and Lee, K. W. (2010), Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Korea Concrete Institute, 22(4), 535-546.

Kodur, V. K. R., and Naser, M. Z. (2013), Importance Factor for Design of Bridges Against Fire Hazard, *Engineering Structure*, 54, 207-220.

Korea Expressway Corporation (2013), Development of Fire Risk Assessment Process for Expressway Bridges.

Korea Infrastructure Safety Corporation (2010), Guideline of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures.

Lee, J. H., Kim, K., Jeong, Y., and Kim, W. (2015), A Comparison Study of Model Reduction Method with Direct Impact Analysis of Truck-column Collision, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Computational Structural Engineering Institute of Korea, 28(6), 675-682.

Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014), Statistical year book of MOLIT 2014, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), Limit State Based Highway Bridge Design Code, Korea Road and Transportation Association.

Sharma, H., Gardoni, P., and Hurlbaeus, S. (2014), Probabilistic Demand Model and Performance-Based Fragility Estimates for RC Column Subject to Vehicle Collision, *Engineering Structures*, 74, 86-95.

The Korea Transport Institute (2015), An Analysis of Emergency Restoration Plan and Disaster Profiling for Highway Structure, The Korea Transport Institute.

Received : 03/11/2016

Revised : 05/04/2016

Accepted : 05/23/2016

요 지 : 차량충돌은 가장 빈도가 높은 교량 붕괴의 원인 중 하나로 알려져 있으며, 최근 재해에 대하여 대책 수립 및 관리의 필요성이 공익 안전을 위해 제기되고 있다. 본 연구에서는 차량 충돌로 인한 교량 피해에 대하여 위험도 분석을 실시하였다. 위험도 분석 단계는 세 단계로 구분하였고, 예비위험분석 단계에서는 충돌의 발생가능성을 확인하며, 기본위험분석 단계에서는 발생가능성, 취약성, 중요도에 대한 위험도 점수평가를 통한 위험도 등급을 산정하였다. 마지막 상세위험분석 단계에서는 위험도가 높은 등급에 대하여 상세분석을 실시한다. 본 연구에서는 예비위험분석과 기본위험 단계에 집중하여 위험도 등급 구분을 위한 네 가지의 급간분류법을 적용하였다. 충돌 사례와 분석 결과를 비교하여 적절한 급간분류법을 결정하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 위험도 분석법은 유사한 재난에 대한 대책수립을 위해 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 교량, 위험도 분석, 유지관리, 차량 충돌