Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 21, No. 6, November 2017, pp.185-195
https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.6.185

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

FDS와 GIS를 이용한 교량 화재 위험도의 정량적 평가 및 적용방안

안호준[1], 박철우[2], 김용재[3], 장영익[4], 공정식[5*]

Quantitative Fire Risk Assessment and Counter Plans Based on FDS and GIS for National Road Bridges

Ho June Ann[1], Cheol Woo Park[2], Yong Jae Kim[3], Young Ik Jang[4], Jung Sik Kong[5*]

Abstract: In recent years, unexpected bridge fire accidents have increased because of augmenting the number of traffic volumes and hazardous materials by the increment in traffics and distribution business. Furthermore, in accordance with the effort of using the under space of bridges, the ratio of occupied by combustible materials like oil tanker or lorry has been increased. As a result, the occurrence of bridge fire has been growing drastically. In order to mitigate the accident of bridge fire, risk assessment of bridge fire has been studied, however, practical risk models considering safety from users' viewpoints were scarce. This study represented quantitative risk assessment model applicable to national road bridges in Korea. The primary factors with significant impacts on bridge fire accidents was chosen such as clearance height, materials of bridges, arrival time of fire truck and fire intensity. The selected factors were used for Fire Dynamics Simulation (FDS) and the peak temperature calculated by FDS in accordance with the fire duration and fire intensity. The risk assessment model in bridge fire reflected the FDS analysis results, the fire damage criteria, and the grade of fire truck arrival time was established. Response plans for bridge fire accidents according to the risk assessment output has been discussed. Lastly, distances between bridges and fire stations were calculated by GIS network analysis. Based on the suggested assessment model and methodology, sample bridges were selected and graded for the risk assessment.

Keywords: Bridge fire, Risk assessment, GIS, Counter Plan, Computational fluid mechenics

1. 서 론

교량에서의 화재는 하부 형하공간이나 지하도로와 같이 주로 밀폐된 공간에서 차량사고와 발화성 적치물, 교량상부에 매달린 가스관에서의 누출된 가스 폭발 등 다양한 요인에 의해서 발생한다. 교량 부근에서 화재가 발생하면 구조물에 손상을 입히며 극심할 경우 붕괴까지 이어지는 막대한 손실로 이어질 수 있다(Lee et al., 2011). 이러한 화재피해를 경감시키기 위한 다양한 대응방안들이 제시되어 왔으나, 대형화재가 발생하여 막대한 손해를 초래하는 사례가 증가 하고 있다. 교량은 화물, 인구, 각종 물자 등 이 도시주변으로 들어올 수 있도록 대중교통의 주요 운송통로로서 화재 발생 시 대형 참사로 확대될 가능성이 높으며, 사회구조가 복잡·다양화재 발생 사고의 증가로 국민들이 교량 화재의 위험에 노출됨에 따라 화재발생시 신속한 대응방안을 마련하여 인명과 재산피해를 최소화할 필요가 있다. 현재 국내의 경우 화재발생과 관련한 위기대응 매뉴얼이나 긴급조사 방안이 마련된 터널과 달리, 교량에 대한 화재대응 매뉴얼은 마련되어 있지 못하며 기본적인 방재시설조차도 설치 사례를 찾기 어려운 실정이다(Lee et al., 2011).

국내의 대표적인 사고사례로는 서울외곽순환고속도로 부천 고가교 하부에서 불법 주차되어 있던 유조차에 불꽃이 점화되어 하부주차 차량 29대 및 콘테이너 박스를 전소시켜 대형화재로 이어진 경우가 있다(Fig. 1).

이로 인하여 교량 강재 거더의 손상 및 슬래브의 과다 처짐, 교각의 콘크리트 열화 등 구조물 주요부재의 손상과 방음판 및 광케이블 소실 등 부속시설의 화재피해가 발생하였다(Lee et al., 2011; Baik et al., 2016).

국외 교량화재 사례로는 2007년 4월 29일 새벽 3시 45분쯤 샌프란시스코 Bay bridge 고속도로에서 8,600갤론(약 32,550리터)의 기름을 싣고 가던 유조차가 다른 차와 접속사고를 일으킨

[1]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사 후 연구원
[2]정회원, 강원대학교 건설시스템공학과 교수
[3]정회원, 강원대학교 건설시스템공학과 연구 교수
[4]학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
[5]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 교신저자
***Corresponding author:** Jskong@korea.ac.kr
School of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2017 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

뒤 뒤집히면서 화재가 발생했다(Fig. 2). 이 사고로 불길이 200 피트 이상 솟아오르는 화기가 발생하였으며, 화씨 2,700도가 넘는 약 3시간 동안의 화재로 결국 San Francisco-Oakland Bay Bridge로 연결되는 접속 램프교가 붕괴되었다. 캘리포니아 교통국에 따르면 매일 7만 5천여대의 차량이 이 구간을 운행하고 있었으며 28만 여명의 운전자들이 인근 Bay bridge를 사용해 샌프란시스코로 출근하고 있어 교통 체증에 대한 막대한 피해가 발생했던 것으로 나타났다(Astaneh-Asl et al., 2009; Lee et al., 2011). 국내 부천고가교나 미국 샌프란시스코 고속도로 화재 사고사례와 같이 화재에 대한 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 교통기능 마비, 복구비용 등 사회적·경제적으로 대규모 2차 피해를 초래 할 수 있다.

이러한 피해를 최소화하기 위해서 교량화재의 정량적 위험성 평가가 필요하나, 국내에는 건축구조에 비해 토목구조물에 대한 상대적 연구가 부족하며 주로 터널화재만을 중심으로 진행되어 왔다(Zi et al., 2009). 국내에서는 내화설계가 필요한 대상교량을 선정하기 위해 Cremona (2012)의 위험도 평가 기법을 교량화재 위험도 평가에 적용하고, 허용 가능한 위험군과 완화가 필요한 위험군으로 분류하여 대응방안이 필요한 교량을 선별한 연구(Kim et al., 2013)가 수행된 바가 있다.

국외 선행연구로는 실제화재가 발생한 I-65 Birminham bridge 등의 교량들을 모델로 CFD 해석을 통해 화원의 위치 및 화원강도 그리고 형하고를 고려한 교량 붕괴정도와 대응방안을 분석한 연구(Wright et al., 2013) 등이 있다.

그러나 교량화재에 대한 대부분의 선행연구는 기초연구단계이거나 실제 교량에 적용하기 어려운 위험도 평가 모델을 제시하고 있다. 따라서 교량상의 화재사고에 의한 피해정도와 그에 따른 사회비용을 최소화하기 위해서는 사용자가 즉각적으로 의사결정에 적용할 수 있는 교량화재에 대한 위험등급 평가모델 수립과 대응방안개발이 필요하다.

본 연구에서는 사회적 요구에 따라, 교량 구조물의 화재위험도를 평가하고 이를 기초로 위험 수준에 따른 대응체계를 제안하고자 한다. 국도 상에 존재하는 교량을 대상으로 교량구조물의 특성, 화재원의 종류에 따른 영향을 검토하기 위해 Fire Dynamic Simulators(FDS) 해석을 수행하였다. FDS 해석결과를 구조물의 손상등급에 적용하여 위험도 평가 모델을 수립하였으며, 각 위험군에 따른 대응방안을 제시하였다. 수립된 위험도 평가 모델에 실제교량의 적용성을 평가하기 위해, GIS의 Network 분석기능을 통해 소방차량의 교량까지 도착시간을 산정하고 각 교량의 위험도 등급을 예시적으로 평가하였다. 이러한 교량 화재 위험도 평가의 목적은 위험도를 기반으로 소방 또는 방재 전략을 사전 구축함으로써 화재를 예방하고 만에 하나 화재 발생시, 신속하게 정량적 재해 규모를 1차적으로 판단함으로써 사회적 피해를 최소화하는 것을 목표로 한다.

Fig. 1 Bucheon bridge(Baik et al., 2016)

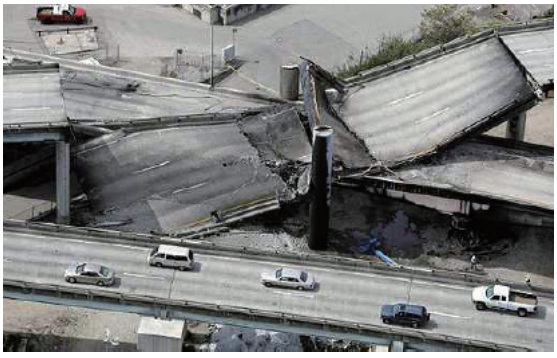

Fig. 2 Bay bridge(Baik et al., 2016)

2. 본 론

2.1 위험도 평가절차

위험도 평가는 개인, 집단, 사회 또는 환경에 대해 허용 가능한 수준의 위험 또는 위험 수준에 관한 정보를 확립하는 과정이며,

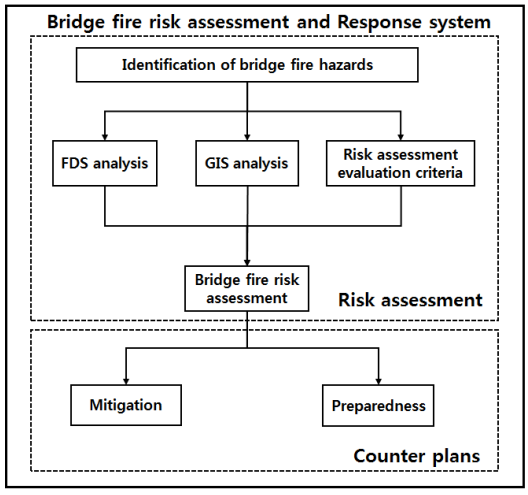

Fig. 3 Bridge fire risk assessment procedure

일반적으로 가능한 한 정량적인 방법으로 위험의 특성을 과학적으로 결정하게 된다(Hurley et al., 2016). 이러한 특성에는 심각도(severity), 공간적 규모(spatial scale), 지속시간(duration) 및 관련된 확률(probability)과 그 원인과 결과에 대한 설명이 포함된다(Hurley et al., 2016). 그러나, 본 연구에서는 국내 교량 화재 사고발생에 대한 데이터 부족으로 사고 발생 횟수와 원인파악이 어렵기 때문에, Fig. 3과 같이 확률에 기반하는 기존의 위험도 평가와는 다른 절차로 접근하였다. 다양한 화재 발생 시나리오가 있겠지만 구조적으로 가장 문제가 될 수 있는 교량 하부 화재의 경우에 대해서만 고려하였으며 특수교를 제외한 일반적인 콘크리트교와 강교를 대상으로 분석하였다. 본 연구의 교량화재 위험도 평가 모델과 대응방안를 수립하기 위한 연구흐름은 Fig. 3과 같으며 아래와 같이 6단계 절차로 분류할 수 있다.

2.1.1 위험인자식별

화재 위험인자 선별과정을 통해 화재가 발생했을 때 교량의 안전성에 크게 영향을 미치는 인자들을 위험도 평가에 반영해야 한다. 화재 진압시간 산정을 위한 소방서 및 교량 위치를 지도화하였고, FDS 해석모델에 반영될 교량 재료의 특성, 화재강도의 크기와 위치, 화원으로 부터의 거리 파악을 위한 형하고 등을 분석하였다.

2.1.2 FDS 해석

Fire Dynamics Simulator(FDS)해석을 통해 교량 하부의 표면온도를 산출하였으며, 설계화재강도와 형하고를 변수로하고 콘크리트와 강교량의 재료적 특성을 반영하여 화재 심각도(Severity)를 산출하였다. 화재는 열이 위쪽으로 향하는 경향을 띄고 있어서 교량 상부보다는 하부 화재가 위험하고, 교량 경간 중앙 하부에서 화재가 발생할 때 가장 취약하기 때문에 보수적으로 교량하부 중앙에서의 화재발생을 가정하였다.

2.1.3 위험도 등급평가 기준

등급평가기준은 강교량과 콘크리트교량의 손상등급과 소방력 도착 등급(소방력 도착시간)을 제시하였다. 교량 구조물의 손상등급은 화재에 노출 시 구조물의 손상정도에 따라 등급화했으며, 소방서에서 교량까지의 소방력 도착시간을 시간대 별로 나누어 기준으로 사용하였다.

2.1.4 위험도 평가모델 구축

강교량과 콘크리트교량 두 개의 위험도 평가 모델을 구축하였으며, 3개의 축으로 구성된 위험도 평가를 제시하였다. 각각의 축은 교량의 형하고, 화재설계강도, 소방력 도착등급으로 구성되어있으며, FDS해석결과를 교량구조물의 손상등급 및 소방력 도착등급을 적용하여 위험도 평가모델에 반영하였다.

2.1.5 GIS 분석

구축된 위험도 평가모델을 적용하여 실제 교량의 위험등급 판단을 위해서는 소방관서로 부터 교량까지 도착시간이 필요하다. 이를 위해, 각 교량과 소방서의 GIS 맵을 구축하고, ArcGIS 10.1의 Network 분석기능을 통해 최근접 소방서의 거리와 소방차량의 도착시간을 산출하였다.

2.1.6 대응방안

효과적인 대응방안의 적용을 위하여, 기존에 존재하는 교량 화재에 대한 대응방안들을 예방/완화적 방법으로 나누었으며, 고위험군부터 저위험군까지 분류하여 위험군 별로 평가된 교량에 맞추어 대응방안이 적용될 수 있도록 하였다.

2.2 교량의 손상등급 및 소방력 도착시간 등급

위험도 평가 절차를 정량적으로 수립하기 위해서는 교량의 손상정도나 소방력의 대응시간 등을 등급화 할 수 있는 기준들이 필요하다. 이를 위해 화재에 노출된 교량 구조물의 화원 종류 및 환경을 고려하여 화재발생 시, 도달 가능한 온도에 따른 손상등급과 화재기동대 도착시간에 따른 위험도 등급을 제시하였다. 교량 구조물은 주로 강재 또는 콘크리트교량으로 나누어지므로, 콘크리트와 강재 부재의 화재에 의한 손상기준을 제시하였다. 또한, 위험도 평가에 반영할 화재기동대 도착시간등급을 제시하기 위해 각국의 소방이론을 확인하고 지역별로 소방력의 도착시간이 기준으로 구축되어있는 영국의 소방이론을 참고하여 소방력 도착시간기준으로 제시하였다.

2.2.1 콘크리트 교량의 위험도 손상등급

콘크리트교의 손상등급은 콘트리트 재료로 구성된 교량의 부재가 온도에 따라 변화하는 상태등급에 따라 분류하였다. 등급 I(None)은 교량의 하부환경을 반영하여 발화요인이 없음을 판단하기 위해 추가적으로 제시하였으며, 등급 I(None)을 제외한 나머지 등급들은 Zhai(2014)의 콘크리트 재료 손상기준을 인용하여 Table 1에 나타내었다. 등급 I(None)은 하천 등의 존재로 발화의 요인이 없어 화재발생이 미미한 등급으로 분류를 하고, 나머지 등급 Ⅱ(Low), Ⅲ(Moderate), Ⅳ(High), Ⅴ(Critical) 등은 화재에 손상된 콘크리트 부재의 손상등급으로 구성되어 있다. 손상등급은 콘크리트 부재의 온도가 300°C, 600°C, 900°C에 도달할 때의 탈색 현상과 박리 및 철근의 비틀림 등의 손상정도를 기준으로 제시하고 있다(Zhai et al., 2014).

2.2.2 강교량의 위험도 손상등급

강교량의 온도별 손상등급은 Table 2에 제시하였다. 콘크리트 교량의 기준과 마찬가지로 등급 I(None)은 하천 등의 존재로 발생가능성이 미미한 것으로 분류하였으며, 등급Ⅱ(Very Low),

Table 1 Fire risk grade of concrete bridge

Grade	Evaluation Criteria
I(None)	The possibility of fire ignition is insignificant due to existing streams.
II(Low)	The structural components have on obvious damage. The maximum temperature reaches less than 300°C.
III(Moderate)	The structural components are slightly damage. None of the reinforcing bars are exposed, and the damage depth is less than 20 mm. The bond strength between the concrete and the steel bars is slightly damaged. The maximum temperature ranges from 300°C to 600°C.
IV(High)	The structural components are obviously damaged. The steel bars are exposed in the local area, and the damage depth is greater than 20 mm. The bond strength between the concrete and the steel bars is seriously damaged. The maximum temperature ranges from 600°C to 900°C.
V(Critical)	The structural components are seriously damaged. The bond strength between the concrete and the steel bars is seriously damaged, and several steel bars are burned down or distorted. The maximum temperature reaches more than 900°C.

Table 2 Fire risk grade of steel bridge

Grade	Evaluation Criteria
I(None)	The possibility of fire ignition is insignificant due to existing streams.
II(Very Low)	Less than 460°C - creep and deformation of steel members hardly occur
III(Low)	Creep, the time-dependent deformation of a material, may be significant in structural steel at temperatures in excess of 460℃. The maximum temperature ranges from 460°C to 538°C.
IV(Moderate)	The yield strength is approximately 60 percent of the value at normal room temperature. The modulus of elasticity has decreased appreciably from the value at normal room temperature. The maximum temperature ranges from 538°C to 700°C.
V(High)	Steel retains about 20 percent strength and stiffness. The steel surface will become noticeably oxidized and possibly pitted, with some accompanying erosion and loss of cross-sectional thickness. The maximum temperature ranges from 700°C to 1000°C.
VI(Critical)	Extreme overheating beyond the rolling temperature can be expected to reduce steel properties to a larger degree. There will be evidence of pitting and flaking on the steel surface if this extreme heating has occurred. The high temperature strength loss and thermal expansion will be extreme at these temperatures and structural damage or collapse will likely precede any overheating material damage. The maximum temperature reaches more than 1000°C.

등급III(Low), 등급IV(Moderate), 등급V(High), 등급VI(Critical) 등급들은 화재에 노출된 구조물의 손상정도에 따라 분류하였다.

II(Very Low), III(Low)은 ASTM A 36 구조용 강재에 대한 재료의 물성변화를 참고하여 손상등급으로 분류했으며, 등급 Ⅳ(Moderate)는 강재 빔의 한계온도기준 동시에 ASIC의 최대허용설계응력이 항복강도대비 60%로 감소하기 시작하는 538°C로 제시하였다. Ⅴ(High)는 항복강도가 대략 20%정도로 감소하면서, 눈에 띄게 박리현상을 확인할 수 있는 700°C로 선정했다(Hurley et al., 2016).

또한, 압연온도(Rolling Temperature)를 넘는 온도에서는 강재의 강도을 크게 감소시키며 대부분의 경우 이 온도가 도달하기 전에 붕괴나 심각한 구조적 손상이 생길 가능성이 높다(Wright et al., 2013). 또한, 일반구조용강의 압연온도가 1000°C이상에서 압연온도가 형성되므로(Wright et al., 2013; Domone et al., 2010), Ⅵ(Critical)에서의 교량의 붕괴나 과도한 처짐의 발생가능성이 존재하는 온도는 보수적으로 1000°C로 제시하였다.

2.2.3 소방력 도착등급

건물의 경우 대부분의 화재는 5분 또는 8분 이내에 진압하지 않으면 당해 건물을 화재로부터 보호할 수 없거나 인근 건물로 화재가 확대된다. 일본의 경우는 목조건물의 수가 줄어들고 있는 점을 감안하여 최근에는 5분 대응에서 8분 대응으로 완화되었다. 이는 화재모델의 실험에 기초하는 것이며 화재는 5분 또는 8분 이내에 진화가 이루어져야 한다는 근거로 화재성장곡선이

Table 3 The fire suppression mobilization time(Martin, 1999)

Hazard area	Region type	Fire suppression mobilization time(min)		
		First arrived	Second arrived	Third arrived
A	major commercial, business, Industrial	5	5	8
B	small business, Industrial, high-rise apartment building	5	8	*
C	residential	8-10	*	*
D	region which is not applied to A, B, C	20	*	*
RR	country	*	*	*

Table 4 Fire suppression mobilization time grade

Grade	Fire suppression moblitztion time grade
I(1 grade)	Less than 5 minutes
II(2 grade)	5~8 minutes
III(3 grade)	8~10 minutes
IV(4 grade)	10~20 minutes
V(5 grade)	More than 20 minutes

사용되고 있다. 화재성장곡선은 한국뿐만 아니라 일본, 영국, 등 많은 나라에서 소방력 산출기준과 소방관서 배치의의 기초이론이 되고 있다(Koo et al., 2012). 따라서, 소방 기동대의 출동시간은 화재 진압에 있어 매우 중요하며, 영국의 경우 Table. 2과 같이 소방력 도착등급을 사용하고 있으며 위험지역별 현장 도착 기준시간을 정리하여 재난발생 시 대응하고 있다(Martin 1999; Koo et al., 2012). 기준은 위험등급에 따라 A, B, C, D, RR 등 5개 지역으로 나누고 그에 따라 대응시간을 정한다.

교량의 경우 소방력 도착에 등급에 대한 등급이 존재하지 않기 때문에 그와 유사한 건물에 대한 등급을 인용하였다. 영국과 한국 모두 5분 소방대응이론을 채택하고 있으므로, 본 연구에서는 영국의 화재대응 소방력 도착등급를 인용하여 Table 4와 같이 본 연구에서 반영할 소방력 도착등급을 제시하고 위험도 등급기준으로 활용하였다.

2.3 FDS anlysis를 이용한 화재해석

화원 발생 위치상 교량 상부구조와 하부구조에 대하여 직접적인 화재피해를 발생시키기 때문에 하부에서 발생하는 화재가 위험하다(Lee et al., 2016). 교량 하부에서 발생하는 화재는 화재의 강도와 형하고의 높이 그리고 교량의 재료에 따라 그 피해 정도가 크게 달라진다. 교량재원에 따른 교량의 화재사고에 대한 심각도(severity)를 확보하기 위해서 Fire Dynamics Simulator (FDS)을 이용해 다양한 교량 하부 화재에 대한 다양한 해석을 수행하였다. FDS는 Computational Fluid Dynamics(CFD)이론에 의해 계산을 수행하며 화염으로부터 방출되는 열과 연기의 유동 해석에 초점을 맞추고 있다(McGrattan et al., 2004). 교량 하부에서 발생하는 화재는 화재의 강도와 형하고의 높이 그리고 교량의 재료에 따라 그 피해 정도가 크게 달라지므로, 화재 시뮬레이션을 수행하고 위험도 평가에 반영할 해석결과들을 분석하였다.

2.3.1 설계화재곡선

설계화재강도를 가정하는 방법은 아래와 같이 3가지로 나눌 수 있다(Peacock et al., 2005).

①지속화재(Steady Fire)로 가정

화재의 시작으로부터 종료까지 방출되는 에너지의 량이 일정하다고 가정하는 방법

②성장화재(Growth Fire)로 가정

화재가 시작으로부터 성장하는 화재로 설정된 크기까지 성장하고 나면 그 이후는 일정하다고 가정하는 방법

③성장 및 변화를 포함하는 화재를 가정

화재의 진행을 묘사하는 화재로 화재의 성장과 진행, 감소를 모두 포함하는 방법

본 연구에서는 Fig. 4와 Table 5에 제시되어 있는 것과 같이 성장 및 변화를 포함하는 도로터널 방재지침(2016)의 설계화재모델을 FDS 해석에 반영하고, 국외의 사례들을 참고하여 기존의 제시된 설계화재강도 이외의 강도들을 해석 Case에 추가하였다.

EUREKA Fire Tests(Haack 1998)에는 heavy good vehicle에 대해서 100~130 MW까지의 화재강도의 실험결과를 제시하고 있으므로, 100 MW의 위험물 수송차량은 130 MW의 화재강도로 상향시켜 보수적으로 결과값을 도출하였다. 유류가 유출되었을 경우 화물차(petrol/gasoline tanker with a leak)에서 30 MW이상의 화재강도로 권고치를 제시(Lacroix, 1998)하고 있으므로 50 MW와 100 MW의 화재강도 케이스를 추가

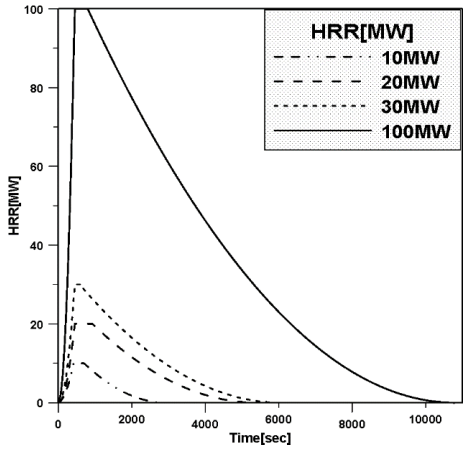

Fig. 4 FDS model of fire with growth and change

Table 5 FDS model of fire with growth and change

	Car	Bus	Truck	Harzardous Truck
Fire intensity (MW)	10.0	20.0	30.0	100
Growth rate(α)	0.05	0.1	0.15	0.5
Decay rate(β)	0.002	0.001	0.001	0.001
Growth time(Sec)	450.	450.	450.	450
Peak time(Sec)	268.	455	102.	350

하여 해석을 수행하였다.

2.3.2 화원의 면적과 설계화재강도

화원모델의 면적은 도로터널 방재지침(2016)의 차종별 평균 길이를 반영하여 각각의 화원 면적을 선정하였다. 또한, 차량의 사고발생시 화원의 높이를 고려하여 차량 화재 시 화원 중심은 1 m높이에서 발생하는 것으로 가정하였다. 결론적으로, Table 6과 같이 총 6개의 화원별 화재면적과 높이를 FDS의 화원 모델링에 반영하였다.

2.3.3 FDS model

교량의 물성치는 강교량과 콘크리트 교량으로 나누어 Table 7과 같이 FDS에 입력하였다. 교량의 형식별 기하학적 형상을 모두 고려할 수 없기 때문에 단순하면서도 국도상에 많은 비율을 차지하고 있는 슬래브교의 형태로 모델링을 하였다. 실제 교량의 다양한 형하고 높이를 반영하기 위해 Table 6에서 제시한 각각의 설계 강도에 따라 형하고를 1 m씩 높여가며 해석을 수행하였다. Fig. 5에 온도측점 위치와 해석모델 예시를 나타내었다. FDS 해석공간의 크기는 9 m×8 m×16 m로 설정하였고 9 m×8 m ×1 m 크기의 슬래브 교량과 Table 8에 제시된 화원으로 모델링을 하였다. 화원은 교량을 지지하는 상부구조(거더)와 하부구조(교대 및 교각) 대하여 직접적인 화재피해를 발생시키기 때문에 (Baik et al., 2016), 화원은 교량하부의 정 중앙에 위치시켰다. 온도분석 대상은 화재의 영향을 가장 크게 받는 화원의 중앙에서부터 수직거리에 존재하는 교량 하부표면에서의 온도에 대해 측정하였다. 해석시간과 경계조건 및 Mesh size는 Table 8에 제시하였다.

Table 6 Model of fire intensity and size of source

Type	Fire intensity	Size (W×D×H)
Car	10 MW	4.34×1.7×1.0
Bus	20 MW	4.5×2.0×1.0
Truck-A	30 MW	6.1×2.0×1.0
Truck-B	50 MW	6.1×2.0×1.0
Truck-C	100 MW	6.1×2.0×1.0
Harzardous truck	130 MW	8.74×2.5×1.0

Table 7 Material properties of bridge(Zi et al., 2014)

Division	Explanation	Concrete	Steel
EMISSIVIYT	Emissivity	1.0	1.0
CONDUCTIVITY	Heat conductivity (W/m/K)	1.7	45.8
SPECIFIC_HEAT	Specific heat (kJ/kg/K)	0.75	0.46
DENSITY	Density (kg/m^2)	2400.	7850.

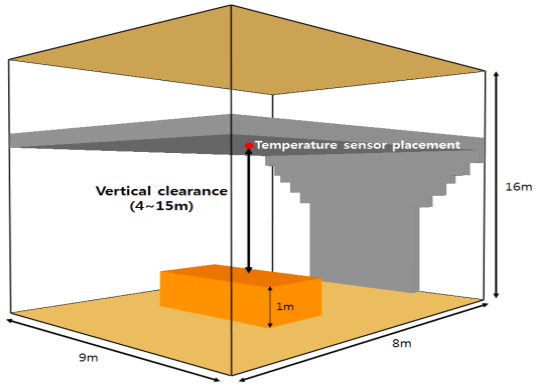

Fig. 5 FDS Temperature measurement point

Table 8 Characteristics of analytical model

Division		Contents
Analysis time	10MW	2980sec
	20MW	5600sec
	30WM	
	50MW	6060sec
	100MW	
	130MW	10800sec
Size of slab bridge (W×D×H)		9m×8m×1m
Mech size		24×20×40=19,200 (0.4m×0.4m×0.4m Cell)
Atmosphere Temperature(°C)		20°C
Boundary condition	Floor. Ceiling	Heat insulated
	Others	Atmosphere air condition

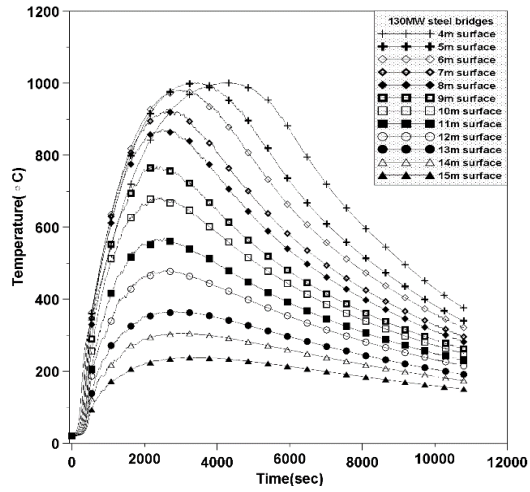

Fig. 6 130 MW Steel bridges temperature-time curve

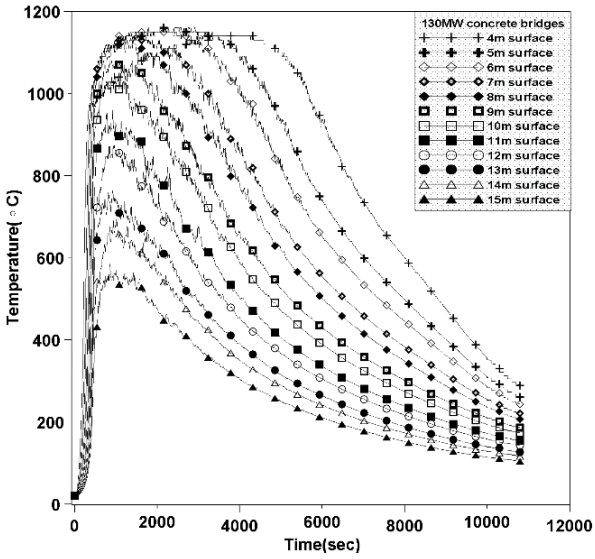

Fig. 7 130 MW Concrete bridges temperature-time curve

2.3.4 FDS analysis results

화원의 크기를 10 MW, 20 MW, 30 MW, 50 MW, 100 MW, 130 MW로 선정하였으며 강교량과 콘크리트 교량으로 분류하고 교량의 형하고 별로 최소 통과높이 4 m부터 화재가 크게 영향을 미치지 못한다고 판단되는 15 m까지 1 m간격으로 총 144개의 케이스에 대해 해석을 수행하였다. 해석시간은 Fig. 4의 화원 모델의 종료시점을 반영해 화원강도별로 입력하였다.

여러 화원의 크기 중에서도 가장 화재의 영향이 크다고 판단되는 130 MW 화원의 콘크리트 교량과 강교량의 해석 결과를 Figs. 6과 7에 나타내었다. 교량의 형하고가 높아질수록 표면온도가 낮아지는 경향을 보여주고 있으며, 130 MW이외의 해석결과 값들도 같은 경향을 나타내었다. 강교량의 경우 콘크리트 교량에 비해 열전도도가 수십배 이상 높기 때문에 열의 유입 및 유출이 빨라 상대적으로 온도가 크게 증가하지 않는 것으로 나타나며, 콘크리트는 열전도도가 낮아서 열을 이동이 늦기 때문에 높은 온도가 측정되는 것으로 판단된다.

2.4 GIS 네트워트 분석을 통한 소방력 도착시간 산정

화재는 시간이 지날수록 인접 구조물로 확산으로 인해 그 피해가 확산될 가능성을 가지고 있으므로, 조기에 짧은 시간 내에 진압하는 것이 중요하다. 따라서, 화재 기동대의 교량구조물까지의 도착시간을 산출하는데 효과적인 ArcGIS 10.1를 이용한 네트워크 분석 기법을 사용하였다. GIS는 지리적 위치를 갖고 있는 대상에 대한 위치자료(spatial data)와 속성자료(attribute data)를 통합·관리하여 지도, 도표 및 그림들과 같은 여러 형태의 정보를 제공한다. 교량과 소방관서의 위치자료와 속성정보를 이용하여, 교량에서 가장 인접해있는 소방관서를 분석할 수 있으며, 소방기동대의 도착시간까지 산출이 가능하다. GIS에서 네트워크는 상호 간에 연결된 일련의 선형 객체이며, 네트워크 사용의 일반적인 예는 고속도로, 철도, 도시 거리, 강. 교통노선(대중교통, 학교버스, 쓰레기, 수거, 우편배달) 그리고 공공설비 시스템(전기, 전화, 상·하수도)등이다(Lee and Sim, 2011). Arc GIS를 이용한 가로망 분석의 대표적인 방법으로는 Network analyst를 사용한 경로분석(OD Cost Matrix), 근접시설 분석, 서비스권역 분석 등이 있다(Lee and Sim, 2011). 본 연구는 네트워크 거리 및 시간에 관한 논의이므로 OD Cost Matrix 기능을 사용하였다.

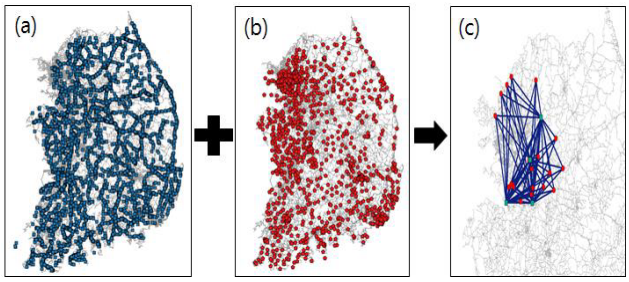

Fig. 8 (a) bridges; (b) fire stations; (c) OD cost matrix analysis

공간분석을 위해 필요한 기초데이터는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 전체 가로망 데이터(network data set): 속성정보로써 노선의 길이 및 설계속도정보 포함
- 국도상교량과 소방서의 위치정보: point data

속성정보 중 속도정보는 도로의 설계속도를 속성정보로 사용하였고, 네트워크 분석단계에서 사용을 위해 point 데이터로의 구축이 필수적이기 때문에 국도교량 7343개와 전국 소방서 1246개의 point를 GIS 지도로 구축하였다.

구축된 GIS의 해석절차는 Fig. 8과 같으며, 왼쪽부터 Fig. 8(a)는 교량, Fig. 8(b)는 소방서의 지도를 나타내며, Fig. 8(c)는 이를 통합하여 도로네트워크를 기반으로 한 OD cost matirx analysis 분석 결과를 나타낸다. 교통주제도의 속성정보를 이용해 설계속도에 기반한 전국도로 네트워크 지도 데이터셋에 전국 주요 소방서와 일반국도교량 GIS 지도를 중첩시키면 Fig. 8과 같이 출발지와 목적지의 도착시간 계산을 수행할 수 있다. GIS 분석 결과예시 Fig. 8(c)를 참고하면 분석수행이 결과가 직선으로 보이지만 실제 내부적 계산 및 결과 값은 네트워크 거리가 반영된 시간으로 산정되므로 각 교량에 대해 Table 4의 소방력의 도착등급 분류가 가능해진다.

2.5 교량화재 위험도 평가와 대응방안

FDS 해석결과와 데이터를 제시한 구조물의 손상등급 및 소방

력 도착등급(5분 미만, 5-8분, 8-10분, 10-20분, 20분이상)을 적용하여 위험도 평가모델을 수립했다. 위험도 평가모델에서 X축과 Y축은 각 교량의 형하고(4 m~15 m)와 화원의 강도(10 MW~130 MW)로 구성하고 Z축은 소방력 도착시간으로 구성하여 3축 위험도 평가모델을 구축하였으며, 위험도 평가 모델의 적용결과에 따른 대응방안들을 적용하고자 예방적인 방안들과 대비적인 방안으로 분류하여 제시하였다.

2.5.1 콘크리트 교량의 화재 위험도 등급평가

FDS 해석을 통해 도출된 교량구조물의 하부표면온도 결과값(Table 4), 소방력 도착등급 구간 내에 도달하는 구조물의 최고 표면온도(Table 1), 그리고 화재온도에 따른 콘크리트 교량의 손상등급을 적용하여 Fig. 9와 같이 콘크리트교에 대한 3축 위험도 평가 모델을 제시하였다. 화재 위험도 평가모델은 화원의 크기와 교량의 형하고(4 m~15 m) 그리고 소방력 도착등급의 3개 축으로 구성되어 있으며, Grade Ⅰ(None)은 하천 등의 존재로 발생 가능성이 미미하다고 판단되는 경우로 교량의 하부환경을 확인 후 따로 분류하도록 하고, 나머지 등급인 Ⅱ(Low), Ⅲ(Moderate), Ⅳ(High), Ⅴ(Critical)는 화재강도와 소방력 도착시간에 따라 교량의 위험등급을 판단 할 수 있다.

위험도 평가를 적용하고자 Table 12와 같이 대한민국 경기도에 존재하는 임의의 10개의 콘크리트교량의 위험등급을 산정하였다. 화재강도는 가장 위험할 것으로 판단되는 130 MW로 선정했으며, 형하고 하부환경 등을 반영하였다. 소방력 도착시간과 근교소방서는 GIS의 분석결과이며 산정된 도착시간은 Table 4의 소방력 도착등급에 따라 분류가 가능하다. 이러한 결과들을 Fig. 9에 대입하면 각각의 위험등급을 산정할 수 있다.

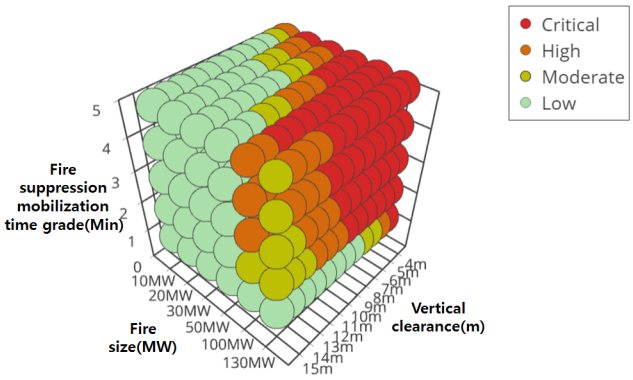

Fig. 9 Triaxis risk assessment model for concrete bridges

Table 9 Fire risk assessment in concrete bridge applied 130 MW

Fire intensity	Bridge name	Risk grade	Suburb fire station	Fire suppression moblization time	Vertical clearance(m)	Under the bridge condition
130MW	Gasan IC bridge	Critical	Yeoju fire station	7 min	4.6	General road
-	Gung non Bridge	Critical	Pyungtaik fire station	8 min	7	Unpaved road
-	Neung won Bridge	Critical	Bundang fire station	11 min	4.5	General road
-	Duksung bridge	Critical	Yongin fire station	7 min 30 sce	4.3	General road
-	Deade bridge	Critical	Yangpyeong fire station	20 min	4.5	General road
-	Gilmeung bridge	Critical	Pocheon fire station	11 min	6	General road
-	Ganmea bridge	High	Yeoju fire station	7 min 30 sce	4.5	General road
-	Bonghwa bridge	Critical	Hwaseong fire station	15 min 30 sec	4.6	General road

Table 10 Fire risk assessment in steel bridge applied 130 MW

Fire intensity	Bridge name	Risk grade	Suburb fire station	Fire suppression moblization time	Vertical clearance(m)	Under the bridge condition
130 MW	Damyang bridge	Moderate	Hwaseong fire station	18 min	4.5	General road/ unpaved road
	Neri overpass bridge	Very Low	Anseong fire station	4 min	4.5	General road
	Dongrim bridge	Very Low	Bundang fire station	9 min	4.8	General road
	Geumnam bridge	Moderate	Namyang-ju fire station	12 min	4.5	General road
	Goduk bridge	Very Low	Pyungtaik fire station	7 min	4.8	General road
	Gosan bridge	Very Low	Gwangju fire station	7 min 30 sec	4.3	Highway
	Dongbang bridge	None	Hwaseong fire station	7 min	5.3	Only stream existing
	Balahn bridge	Very Low	Hwaseong fire station	1 min 30 sec	4.5	General road

2.5.2 강교량의 화재 위험도 등급평가

콘크리트 교량의 위험도 평가와 마찬가지로 FDS의 해석결과를 강교량의 손상등급에 적용하였다(Table 2). 발생가능성이 미미한 Grade I(None)을 제외하고 나머지 등급 II(Very Low), III(Low), IV(Moderate), V(High), VI(Critical)에 따른 위험도 등급평가를 Fig. 10과 같이 나타내었으며, Table 10은 강교량의 위험도 평가 적용 결과이다.

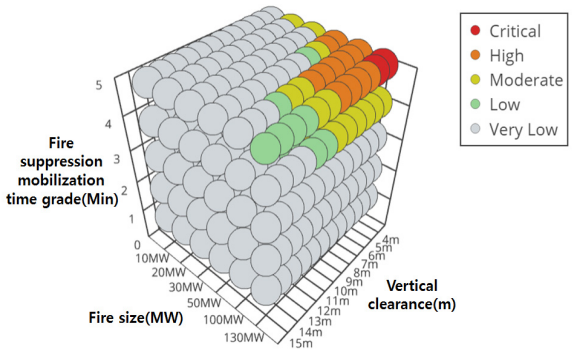

Fig. 10 Triaxis risk assessment model for steel bridges

2.5.3 교량화재의 대응방안

Table 10 또는 Table 11과 같이 대상교량의 화재위험등급이 결정 된 후 교량 별 화재 대응방안 수립은 위험도 등급에 따른 대응방안들을 적용하고, 화재사고를 사전에 예방하고 대비하려는 목적을 가지고 있다. 선행연구(Kim et al., 2013; Wright et al., 2013)에서 제시되었던 대응 방안들을 분석하여 화재발생 가능성 저감, 위험요소 제거 등의 항목들은 완화(Mitigation)대응으로 분류하고, 화재 발생 시 효과적인 대응이 가능하도록 준비하는 항목들은 대비(Preparedness)대응으로 나누어 Table 11에 제시하였다.

3. 결 론

교량의 화재는 교량하부에 주차된 차량 또는 적치된 발화물질의 연소 그리고 교량상부에 메달린 가스관에서 누출된 가스폭발 등 다양한 원인에 의해서 발생된다(Lee et al., 2011). 교량에 인접해서 화재가 발생하게 되면 구조물의 손상피해 뿐만 아니라 인명피해나 교통체증으로 인한 추가적인 경제적 손실로 이어진

Table 11 Counterplans

Bridge fire grade	Critical	High
Counter plans	*Mitigation - Control Combustible Materials - Remove bus stops and parking lots - Propose detours for hazardous material truck - Install speed dump - Install speed indicator - Improve drainage system. - Traffic Control *Preparedness - Install fire surveillance equipment - Install fire suppress equipment - Establish contingency plans linked to fire department and secure fire - Reinforce the bridge with fire resistance design/rehabilitation - Manual Fire Alarm Boxes	*Mitigation - Control Combustible Materials - Remove bus stops and parking lots. - Propose detours for hazardous material truck - Install speed dump - Install speed indicator - Improve drainage system *Preparedness - Establish contingency plans linked to fire department and secure fire

Bridge fire grade	Moderate	Low/very low
Counter plans	*Mitigation - Control combustible materials - Remove bus stops and parking lots. - Propose detours for hazardous material truck *Preparedness - Establish contingency plans linked to fire department and secure fire	*Mitigation - Control combustible materials - Remove bus stops and parking lots.

다. 본 논문에서는 최근 국내외 교량화재의 사고사례와 피해규모 등을 분석하고, 교량화재의 위험도 평가 필요에 따라 실용적인 교량의 화재위험도 등급평가 및 대응방안을 제안하였다. FDS를 통한 화원 종류별 환경 인자별 화재 해석 및 온도에 따른 재료물성치의 변화 분석, 그리고 소방력의 정량적 등급화 과정 등을 통해 강교량과 콘크리트 교량의 화재 위험도 등급평가 및 대응방안을 구축하였다. 제시한 위험도 평가모델을 토대로 일반국도상의 대상교량을 선정하여 화재위험등급을 산출하였으며, 위험등급에 따른 예방 및 대비책을 제시하였다. 이러한 화재 위험도 분석 과정을 통해 고위험으로 판단되는 교량 구조물의 화재에 대한 사전예방 및 대비가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 위험도평가에 반영될 교량 화재에 영향을 미치는 주요한 인자들을 선정하고, 교량의 온도에 따른 손상기준과 화재 시 소방차의 도착시간 등급기준을 제시하여 위험도 평가에 반영될 기준들을 수립하였다.
2) 화재해석 프로그램 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 사용하여 강교량과 콘크리트교량의 형하고와 화재강도에 따른 해석을 수행하고 각각72개씩 총 144개 교량의 하부의 시간대별 표면온도 산출하였으며, 본 연구에서 제시한 강교와 콘크리트교의 손상기준을 반영하여 소방력 도착등급, 화재강도, 형하고로 구성된 3축 위험도 평가모델을 구축하였다.
3) 실제 적용에 필요한 GIS를 이용하여 도로의 설계속도가 반영된 교량과 소방력의 도착시간을 산정하였으며, FDS와 GIS 데이터를 3축 교량화재 위험도 평가모델에 적용함으로써 각 교량의 위험도 등급을 결정하고 위험도 평가 결과에 따른 방안을 대응방안을 제시할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 교통물류연구개발사업의 연구비지원(15TLRP-C108640-01) 및 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었습니다.

References

Astaneh-Asl, A., Noble, C. R., Son, J., Wemhoff, A. P., Thomas, M. P., and McMichael, L. D. (2009), Fire protection of steel bridges and the case of the MacArthur maze fire collapse. *In TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, 1-12.

Baik, H. S., Park, C. W., and Shim, J. W. (2016), Need for Confrontational Strategy of Bridge Fire Protection with Domestic and Foreign Cases, *JOURAN OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, 64(7), 10-12.

Cremona, C. (2012), Structural performance: Probability-based assessment, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ07030.

Domone, P. L. J. and Illston, J. M. eds. (2010), Construction materials: their nature and behaviour, 4th ed, Spon Press, Milton Park, Abingdon, Oxon, New York.

Haack, A. (1998). Fire protection in traffic tunnels: general aspects and results of the EUREKA project. Tunnelling and underground space technology, 13(4), 377-381.

Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. L., Watts, J. M., and Wieczorek, C. J. eds. (2016), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, New York, NY.

Kim, W., Jeoung, C., Gil, H., Lee, I., Yun, S. H., and Moon, D. Y. (2013), Fire Risk Assessment for Highway Bridges in South Korea. Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board*, (2551), 137-145.

Koo, S. and Yoo, H. H. (2012), An analysis of fire area in Jinju city based on fire mobilization time. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, 20(4), 127-134.

Lacroix, D. (1998), The new piarc report on fire and smoke control in road tunnels, 185-197.

Lee, H. H. and Sim, J. H. (2011), GIS Geographic Information Science: Theory and Practice, Beop Moons, Gyeonggi-do, 10881.

Lee, J. B., Kim, I. K., and Cha, C. J. (2011), Fire Damage Case and Condition Analysis about Concrete Bridges, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 23(3), 32-38.

Martin, D. T. (1999), Fire service emergency cover planing a flexible response, *International Conference on Fire Service Development Analysis, Jennings*, C. R(Ed.). Attendees Proceedings, Indianapolis, 2-8.

McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., and McDermott, R. (2004), Fire dynamics simulator (version 5), technical reference guide, NIST Special Publication.

Peacock, R., Jones, W., Reneke, P., and Forney, G. (2005), CFAST−Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport(Version 6) User's Guide, NIST Special Publication.

The Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), The National Guideline for the Installation of Road Tunnel Fire Safety Facilities.

Wright, W., Lattimer, B., Woodworth, M., Nahid, M., and Sotelino, E. (2013). Highway bridge fire hazard assesment, draft final report. Virginia polytechnic institute and state university. TRB Project, (12-85).

Zhai, C., Guo, Y., Lou, Y., and Lu, Y. (2014), Evaluation and repair of fire damage to the concrete structures of a high-rise building (2014), in: M. Grantham, P. Basheer, B. Magee, M. Soutsos (Eds.), *Concrete Solutions 2014, CRC Press*, 485-491.

Zi, G. S., Lee, S. J., Shin, Y. H., Shim, J. W., and Kim, J. H. (2011). Investigation of the Fire Source in the Warehouse under Bridge using FDS Code. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(6), 663-673.

Received : 10/11/2017
Revised : 10/16/2017
Accepted : 10/16/2017

요 지 : 최근 교통과 물류의 발달과 함께 위험물 수송의 증가와 교통량의 증가로 인하여, 주요한 사회기반시설물 중 하나인 교량에 대하여 예상하지 못한 화재사고 화재 발생이 증가하는 추세이다. 또한, 교량 하부 공간의 효율적인 사용에 대한 요구가 늘어남에 따라, 하부에 유조차 및 화물차 등의 위험물질이 적치되는 비율이 증가하고 있으며, 앞서 기술한 이유들로 인하여 최근 교량의 화재 발생 위험성이 급격히 증가하고 있다. 하지만, 이러한 피해를 줄이기 위해, 교량에 대한 화재 위험도 평가가 수행된 사례가 있으나, 사용자의 관점에서 안전성을 고려한 실용적으로 위험도를 평가할 수 있는 모델이 부족하다. 이에 본 연구에서는 국도교량에 적용 가능한 정량적인 위험도 평가모델을 제시하였다. 교량의 화재위험도에 큰 영향을 미치는 형하고, 화재강도, 교량의 재료, 소방차량 도착시간 등을 주요인자들로 선정하였으며, 선정된 인자들을 FDS에 반영하여 화재강도와 지속시간에 따른 각 교량의 최고 온도를 산출하였다. FDS 해석결과와 위험도 등급기준, 소방차량 도착시간을 반영한 화재 위험도 평가 모델과 위험도에 따른 대응방안을 수립하였다. GIS의 네트워크 분석기능을 통해 소방서에서 교량까지의 도착시간을 예시적으로 산출하였으며, 이를 통해 예시적인 교량의 위험도 등급을 평가하고, 그에 따른 대응방안을 제안하였다.

핵심용어 : 교량화재, 위험도 평가, 지리정보시스템, 대응방안, 전산유체역학