열전달 해석을 통한 케이블교량 화재 시 케이블의 온도변화 분석

정 철 현¹ · 최 현 성^{1*} · 이 정 휘¹

¹단국대학교 토목환경공학과

Investigation of Temperature Variation of Bridge Cables under Fire Hazard using Heat Transfer Analysis

Chulhun Chung¹, Hyun Sung Choi^{1*} and Jungwhee Lee¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

Abstract

Recently, there have been frequent occurrences of bridge fires. Fires in cable-supported bridges can damage and brake cables due to high temperatures. In this study, fire scenarios that can occur on cable-supported bridges were set up. In addition, based on the results of vehicle fire tests, a fire intensity model was proposed and cable heat transfer analyses were performed on a target bridge. The analyses results demonstrated that temperature rises were identified on cables with a smaller cross-sectional area. Furthermore, vehicles other than tankers did not exceed the fire resistance criteria. When the tanker fire occurred on a bridge shoulder, the minimum diameter cable exceeded the fire resistance criteria; the height of the cable exceeding the fire resistance criteria was approximately 14 m from the surface. Therefore, the necessity of countermeasures and reinforcements of fire resistance was established. The results of this study confirmed that indirect evaluation of the temperature changes of bridge cables under fire is possible, and it was deemed necessary to further study the heat transfer analysis considering wind effects and the serviceability of the bridge when the cable temperature rises due to fire.

Keywords : cable supported bridge, fire hazard, fire intensity model, heat transfer analysis

1. 서 론

도로 및 교량에서의 화재는 최근까지도 빈번하게 발생되고 있으며, 화재 규모 등에 따라 막대한 인명피해와 경제적 손실을 가져온다. 이러한 화재가 케이블교량에서 발생될 경우 배치된 케이블은 온도상승으로 인해 강성이 감소하여 손상 및 파단이 발생되어 교량의 붕괴를 유발할 수 있다.

일반적으로 케이블부재는 고강도강재로써 높은 인장강도를 가진다. PTI(2012)에서는 케이블의 내화성능을 300℃에 도달하는데 걸리는 시간으로 평가하며, 표면의 온도가 300℃ 상승하는데 최소 30분 이상 소요되어야 한다고 제시하고 있다. ACI Committee 216(1989)에서는 고강도강재에 300℃의 온도상승이 발생될 때 상온에서의 극한강도에 비해 약 20~30%의 강도저하가 발생된다고 제시하였다.

케이블교량에서의 화재를 해석적으로 모사하기 위해서는 우선 화재가 발생하는 주요한 원인을 파악하고 적절한 화재하중을 설정해야 한다. Gil과 Cho(2012)는 국내의 일반교량 및 케이블교량에서 발생하는 대부분의 화재사고는 차량에 의한 화재사고이며, 특히 인화물이 적재된 유조차 화재사고는 교량에 심각한 손상을 초래할 수 있다고 제시하였다.

현재 기준으로 제시된 화재온도-시간 곡선의 경우 대부분 건축구조물 또는 터널 화재에 대한 설계기준이다. 대표적인 예로 Fig. 1과 같이 건축구조물 대상으로 규정된 ISO-834 화재곡선과 터널에서의 화재 실험결과를 토대로 규정된 RABT-ZTV 화재곡선이 있다(PIARC, 1999). 일부 규정에서는 화재강도를 차량 종류에 따른 열방출율(heat release rate, HRR)로 제시하고 있다. Table 1은 미국 도로 터널 내화기준이며, 차량에 따른 화염의 면적, 열방출율 및 최대온도를 제시하고

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3493; E-mail: hschoi112@dankook.ac.kr

Received July 24 2019; Revised August 12 2019;

Accepted August 13 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

Fig. 1 Temperature-time curve

Table 1 Standards for fire of road tunnels in USA

Cause of fire	Equivalent size of gasoline pool (m ²)	Fire HRR (MW)	Maximum temperature (°C)
Passenger car	2	5	400
Bus	8	20	700
HGV	8	20-30	1,000
Tanker	30-100	100	1,200-1,400

있다(NFPA 502, 2004).

위와 같이 제시된 기준의 경우 건축기준 또는 터널화재의 기준이기 때문에 케이블교량에서의 화재를 평가하기에 적합하지 않다. 특히 터널 화재의 경우 폐쇄형 화재이기 때문에 대류와 복사열이 함께 고려된 온도 또는 열방출율이 제시되고 있어 개방형 화재인 케이블교량에서의 화재를 모사하기에 적합하지 않다. 따라서 케이블교량에서의 화재를 적절하게 평가하기 위해서는 개방형 화재 시 온도상승의 주요한 원인이 되는 복사열에 의한 온도 또는 열방출율이 필요하다. Kim(2011)의 연구에서는 차량 화재실험 결과를 통해 화재 모델을 제안하였다. 이 때, 개방공간에서 수행된 차량 화재실험 결과와 밀폐된 공간에서 수행된 차량 화재실험 결과를 비교하여 증가계수를 제안하였으며, 복사에 의한 열전달을 전체 열전달에 1/3 수준으로 평가하였다. 이를 통해 케이블의 열전달 해석을 수행하고 케이블의 온도변화를 검토하였다.

본 연구에서는 Kim(2011)의 연구와 국내외 차량 화재실험 결과를 토대로 케이블교량 화재에 적합한 화재강도모델을 설정하였으며, 화재모델을 통해 대상교량 케이블의 열전달 해석을 수행하여 케이블에 발생하는 온도변화를 검토하였다.

2. 화재 시나리오 및 화재강도모델

2.1 화재 시나리오

앞서 언급한 바와 같이 케이블교량에서 발생하는 화재사고는 차량에 의한 화재사고가 대부분이다. 또한 Table 1에 나타난

바와 같이 차량종류에 따라 열방출율의 차이를 보인다.

일반적으로 화재가 발생된 후 진압되기까지 소요되는 시간은 화재의 크기 및 진화조건에 따라 다양하고 편차가 크다. Table 2는 소방청 국가화재정보센터에서 제공하는 통계 자료를 토대로 2018년 1월 1일부터 2019년 1월 1일 사이에 국내 도로에서 화재사고가 발생되었을 때, 화재 진압을 위한 현장 도착 시간을 분석한 자료이다(national fire data system). 분석 결과 20분 이내에 화재 현장에 도착하는 경우가 98%에 해당된다.

Table 2 Time of arrival at the site in case of fire on the road in Korea

Within 5min	Within 10min	Within 20min	Within 30min	Within 60min
181 (52%)	129 (37%)	31 (9%)	4 (1%)	3 (1%)

따라서 본 연구에서는 케이블교량에서의 화재 시나리오를 차량에 의한 화재로 설정하였다. 화재 진압을 위한 현장 도착 시간은 약 20분 이내로 추정이 가능하지만, 진압시간과 진화조건 등에 따라 화재지속시간은 편차가 클 것으로 판단되어 1시간까지 화재가 지속된다고 가정하였다.

2.2 화재강도모델

Table 3은 기존에 수행된 실물차량 화재실험 결과를 나타낸다. 대부분의 실험이 터널과 같이 밀폐된 공간에서 차량 화재가 발생하였을 때를 모사하기 위해 수행되었으며, 차량 종류, 차량에 적재된 화물 및 실험 환경에 따라 다양한 열방출율을 나타낸다. 특히 밀폐된 공간은 대류에 의해 발생하는 열전달이 온도변화의 주요한 요인이기 때문에 환기여부에 따라 열방출율에서 차이를 나타낸다.

Kim(2011)의 연구에서는 복사에 의한 열전달을 전체 열전달의 1/3 수준으로 평가하였다. Kunikane 등(2002)은 버스 화재실험에서 대류에 의한 열전달을 전체 열전달에 약 67%로 가정하였고 Karlsson 등(2000)은 대류와 복사의 열전달 비율을 7:3으로 제시하고 있다. 이를 종합하면 밀폐된 공간에서 발생하는 복사 열전달은 전체 열전달에 30% 수준으로 볼 수 있다.

가솔린과 같은 위험물을 적재한 유조차 화재는 적재된 인화물의 양, 누출되는 구멍의 크기, 가솔린 풀(pool)의 면적 및 도로의 상태 등에 따라 다양한 열방출율을 나타낸다. Ingason과 Li(2017)의 연구에서 도로 경사와 누출되는 연료의 양에 따른 풀(pool) 면적을 추정하여 화재실험을 수행하였다. 이 연구에서 가솔린 유출량에 따른 단위면적당 열방출율을 2.2MW/m²로 계산하였으며, Heselden(1976)의 연구에서는 가정한 유출량에

Table 3 Heat release rate data from fire experiments

Vehicle and test series	Peak HRR (MW)	Time to peak HRR(min)	Reference
Passenger cars			
Three tests with passenger cars	1.5~2.0	10~15	Mang and Keski-Rahkonen, 1994
Second benelux tunnel test(test 6 and 7)	4.8 and 4.7	11 and 38	Lemaire and Kenyon, 2006
Two tests using the large scale calorimeter	2.3 and 3.4	25 and 5	Yoo <i>et al.</i> , 2007
Bus			
Volvo school bus, EUREKA 499 project	29	5~10	Ingason <i>et al.</i> , 1994
Shimizu tunnel test	27	7	Kunikane <i>et al.</i> , 2002
LGV(Light goods vehicle)			
A simulated truck load(wood and plastic pallet, 2~3 ton), EUREKA 499 project	17	15	Ingason <i>et al.</i> , 1994
A trailer load(36 wood pallets), Second Benelux tunnel test(test 8, 9 and 10)	13, 19, 16	16, 7, 8	Lemaire and Kenyon, 2006
HGV(Heavy goods vehicle)			
HGV trailer with 2 tons of furniture, EUREKA 499 project	128	18	Grant and Drysdale, 1997
A trailer load with total 10.9 ton(woods and plastic pallets), Runehamar tunnel test	202	19	Ingason and Lonnermark, 2005
A trailer load with total 6.8 ton(wood pallets and PUR mattresses), Runehamar tunnel test	157	14	Ingason and Lonnermark, 2005
A trailer load with 8.5 ton(furniture and rubber tires), Runehamar tunnel test	119	10	Ingason and Lonnermark, 2005
A trailer load with 3.1 ton(paper boxes filled with plastic cups), Runehamar tunnel test	66	7	Ingason and Lonnermark, 2005

다른 단위면적당 열방출율을 $2.0\text{MW}/\text{m}^2$ 로 제시하고 있다. Liew와 Deaves(1992)의 연구에서는 Heselden(1976)의 연구결과를 토대로 가솔린 누설 면적을 50m^2 로 가정하여 화재 시 100MW 의 열방출율을 나타낼 것으로 설명하고 있다. Korea Expressway Corporation(2013)의 연구에서는 위험물 수송차량에 대한 최대 열방출율을 100, 160, 및 250MW 로 고려하여 화재해석을 수행하였으며, 열방출율에 따른 시간이력은 유류의 실제 연소곡선을 통하여 결정하였다.

이를 토대로 화재강도모형을 제안하였으며, 제안된 화재강도모형을 Fig. 2 나타내었다. 유조차를 제외한 차량 화재강도는 실험 결과로부터 대류와 복사에 의한 열전달 비율(7:3)을 고려하여 복사에 의한 열방출율을 사용할 수 있도록 제안하였다. 승용차는 10분에 1.5MW 의 최대 열방출율에 도달하여 10분간 지속되다 60분까지 선형 감소하며, 버스의 경우 5분에 9MW 의 최대 열방출율에 도달하여 10분간 지속되다 20분에 4.5MW 까지 감소하고 80분까지 선형 감소한다. 소형 화물차는 10분에 6MW 의 최대 열방출율에 도달하여 5분간 지속되다 60분까지 선형 감소하며, 대형 화물차의 경우 10분에 45MW 의 최대 열방출율에 도달하여 10분간 지속되다 30분에 22.5MW 까지 감소하고 60분까지 선형 감소한다. 유조차의 경우 Korea Expressway Corporation(2013)의 연구에서 사용된 100MW 급의 화재강도모형을 사용하였다.

Fig. 2 Fire intensity model

3. 케이블 열전달 해석

3.1 체적열원 복사모델

일반적으로 열전달 해석에 사용되는 가장 단순한 방법으로는 화재모델의 온도 또는 열방출율을 대상 구조물 표면에 그대로 적용시키는 것이다. 화염이 대상구조물에 완전 접촉된 경우에는 화염의 온도가 그대로 구조물 표면으로 전달된다고 볼 수 있어 위와 같은 방법을 사용하여도 결과에 큰 영향이 없을 것으로 보인다. 그러나 화염이 대상 구조물과 일정 거리 이상 떨어져 있는 경우 위와 같은 방법은 정확한 결과를 도출하기 어려울 것으로 판단된다.

Shokri와 Beyler(1989)는 화염을 체적으로 형상화하여 일정 거리 이상 떨어진 대상 구조물에 복사 열전달에 의해 발생되는 열 유속(heat flux)을 산정할 수 있는 모델을 제안하였다. 이 모델은 바람에 의한 영향은 고려하지 않으며, 다음과 같은 가정으로부터 제안되었다. (1) 화염은 단순하게 기하학적인 체적으로 표현된다. (2) 화염 표면으로부터 복사열이 방출된다. (3) 비가시적인 가스는 많은 양의 복사열을 방출하지 않는다. 이러한 가정으로부터 열 유속(q'')은 식 (1)로 계산된다.

$$q'' = E \times F_{12} \quad (1)$$

여기서, E 는 방출열량(emissive power)이며 단위면적으로부터 단위시간에 발생하는 복사열량을 의미한다. Shokri와 Beyler(1989)는 화염을 원통형 흑체(black body)로 가정하였을 때 식 (2)와 같이 화염의 직경(D)으로부터 방출열량을 계산할 수 있도록 제안하였다. 화염의 면적(A_f)이 원형이 아닐 경우 식 (3)으로 계산한다.

$$E = 58 \times 10^{-0.00823D} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} \quad (3)$$

식 (1)에서 F_{12} 는 화염의 형상계수이며 한 면에서 유입되는 열에너지와 다른 한 면에서 방출되는 열에너지의 비율을 의미한다. 따라서 형상계수는 열이 전달되는 목표물과 화염의 거리에 따라 0에서 1사이의 값을 가진다. 형상계수는 Fig. 3과 같이 복사열을 받는 물체의 수평면(상면 또는 하면)을 고려할 경우와 수직면(측면)을 고려할 경우 그리고 목표 대상이 지표면에 닿아

있는 경우와 지표면 위쪽으로 떨어져 있는 경우를 고려하여 계산하여야한다.

형상계수를 계산하기 위해서는 화염의 높이를 결정해야한다. Heskestad(1983)은 이상화된 화염의 높이(H_f)를 열방출율(Q)과 화염의 직경(D)으로부터 산정할 수 있는 식 (4)를 제안하였다.

$$H_f = 0.235Q^{\frac{2}{5}} - 1.02D \quad (4)$$

Fig. 3(a)와 같이 대상 물체가 지표면에 있는 경우 대상의 측면에 대한 형상계수($F_{12,v}$)는 식 (5)로 산정할 수 있다.

$$F_{12,v} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} + \frac{Ah}{\pi S \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \quad (5)$$

여기서, $A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S}$, $S = \frac{2L}{D}$, $h = \frac{2H_f}{D}$

Fig. 3(b)와 같이 대상 물체가 지표면 위쪽으로 떨어져 있는 경우 대상 물체의 수직면에 대한 형상계수($F_{12,v}$)는 목표 지점에서 화염의 상부와 하부로 나누어 식 (6)~(8)로 산정할 수 있다.

$$F_{12,v1} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h_1}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h_1}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} + \frac{A_1 h_1}{\pi S \sqrt{A_1^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A_1+1)(S-1)}{(A_1-1)(S+1)}} \quad (6)$$

$$F_{12,v2} = \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h_2}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h_2}{\pi S} \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} + \frac{A_2 h_2}{\pi S \sqrt{A_2^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A_2+1)(S-1)}{(A_2-1)(S+1)}} \quad (7)$$

$$F_{12,v} = F_{12,v1} + F_{12,v2} \quad (8)$$

여기서, $S = \frac{2L}{D}$

$$h_1 = \frac{2H_{f1}}{D}, \quad h_2 = \frac{2H_{f2}}{D}$$

$$A_1 = \frac{h_1^2 + S^2 + 1}{2S}, \quad A_2 = \frac{h_2^2 + S^2 + 1}{2S}$$

3.2 대상교량 및 열 유속 산정

본 연구의 대상 교량은 Fig. 4와 같이 3경간 사장교이며

Fig. 3 Cylindrical flame-shape configuration factor geometry(Beyler, 2002)

Fig. 4 Objective bridge overview and analysis target

Fig. 5 Distance between lanes and a cable

주경간장은 470m이고 측경간은 각각 200m이다, PY1측 측경간에 위치한 최대 단면적(0.013m^2)을 갖는 1~4번 케이블과 최소 단면적(0.005m^2)을 갖는 17번 케이블을 선정하여 열전달 해석을 수행하였다.

열전달 해석을 위한 열 유속은 Table 1의 차량 종류별 화염의 면적(유조차의 경우 50m^2), Fig. 2의 화재강도모델 및 Fig. 5의 케이블과 차선 사이 거리를 식 (1)~(4) 및 식 (6)~(8)에 대입하여 계산하였다. 또한 계산 시 교량의 노면으로부터 케이블 높이변화에 따른 열 유속을 고려하였다. 다른 차량에 비해 비교적 열방출율이 낮은 승용차 화재강도 모델은 케이블에 큰 온도변화를 발생시키지 않을 것으로 판단

(a) Bus

(b) LGV

(c) HGV

(d) Tanker

Fig. 6 Heat flux according to vehicle type

되어 열 유속 산정에서 제외하였다. Fig. 6에 차량 종류에 따라 산정된 열 유속을 나타내었다.

3.3 열전달 해석 개요

열전달 해석은 수치해석 프로그램인 Abaqus/standard v2016(ABAQUS, 2016)을 사용하였으며, Fig. 7과 같이 케이블모델은 Solid 요소를 사용하였다. 케이블 단면에 포함된 HDPE 소재의 덕트와 왁스는 화재가 지속될 시 낮은 녹는점으로 인해 내부 스트랜드의 온도변화에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 모델에 포함시키지 않았다. 화염과 케이블은 일정 거리만큼 떨어져 있으므로 Fig. 7과 같이 화염과 케이블이 마주보는 면에 열 유속을 도입하였다.

케이블의 열적 물성은 일반 강재의 열적 물성과 동일하게 적용하였다. 일반 강재의 비열(specific heat)과 열전도도

Fig. 7 FE model of the cable and loading position

(a) Specific heat

(b) Thermal conductivity

Fig. 8 Thermal properties of the cable

(thermal conductivity)는 EUROCODE 3(2005)에서 Fig. 8과 같이 제시하고 있고 이 값을 해석에 적용하였다. 개방된 공간에서의 열전달을 모사하고 있으므로 자연대류상태일 것으로 판단되며, 일반적인 공기의 경우 자연대류상태에서의 대류계수(convection coefficient)는 $5\sim 25\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2013). 케이블교량에서 발생하는 화재는 주로 복사에 의해 열전달이 발생되기 때문에 모델에 대류계수를 $5\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 로 사용하여 대류에 의해 발생하는 열전달을 최소화하였다. 방사율(emissivity)은 체적열원 복사모델에서 방출열량 산정 시 대상을 흑체로 가정하였기 때문에 1.0을 사용하였다.

3.4 해석 결과

열전달 해석 결과의 검토 기준은 PTI(2012)에서 제시하는 내화 성능 검토 기준인 300°C 로 설정하였다.

Fig. 9는 차량 종류별 최대 열 유속(갓길에서의 화재)을 적용하였을 때 케이블에 발생하는 온도변화를 나타낸다. 검토 결과 단면적이 작은 케이블에서 더 높은 온도변화를 보인다. 이는 열 유속이 단위면적당 단위시간에 이동되는 열량이기 때문에 단면적이 작은 케이블에 열전달이 더 활발하게 발생된 것으로 판단된다.

(a) Minimum diameter

(b) Maximum diameter

Fig. 9 Temperature variation in the cable loaded maximum heat flux of vehicles fire at the shoulder

Fig. 10 Temperature distribution in minimum diameter of the cable loaded maximum heat flux of tanker fire at the shoulder

Fig. 11 Temperature variation in minimum diameter of the cable loaded maximum heat flux of tanker fire at each lane

Fig. 12 Maximum temperature of height in a minimum diameter cable occurred tanker fire at the shoulder

또한 유조차 화재가 최소 단면적 케이블에서 발생될 때 약 16~17분부터 300℃ 이상의 온도가 발생되며, 35분에 약 385℃까지 발생되고 그 이후 온도가 감소하여 1시간까지 화재가

지속되었을 때 약 360℃의 온도분포를 나타낸다. 이 때 케이블 단면에 발생한 시간에 따른 온도분포를 Fig. 10에 나타내었다. 약 30분 이후 온도가 감소하면서 화염에 노출되지 않은 면으로 온도분포가 이동한 것을 확인할 수 있다. 유조차 화재를 제외하고 다른 차량 화재가 발생되었을 때에는 모두 케이블에 300℃ 미만의 온도가 발생된다. 따라서 유조차를 제외한 차종은 차선 거리에 따른 온도 검토가 불필요하며, 유조차의 경우 최소 단면적 케이블에서 화재가 발생할 때 차선 거리에 따른 온도 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 각 차선(1~3차선 및 갓길)에서 발생하는 유조차 화재의 최대 열 유속을 최소 단면적 케이블에 적용하였을 때 발생하는 온도변화를 나타낸다. 검토 결과 갓길에서 발생하는 화재를 제외하고 모두 300℃미만의 온도변화를 보인다. 따라서 유조차 화재가 갓길에서 발생될 때 최소 단면적 케이블의 높이에 따른 온도변화를 검토할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 12는 유조차 화재가 갓길에서 발생되었을 때 최소 단면적 케이블에 발생하는 높이 별 최대온도를 나타낸다. 화재가 발생되고 15분까지는 300℃이상의 온도가 케이블 단면에 발생되지 않는다. 그 이후 300℃이상의 온도가 노면으로부터 14m의 케이블 높이까지 발생되며 화재가 1시간 동안 지속되었을 때에도 노면으로부터 14m의 케이블 높이까지 300℃이상의 온도가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 케이블교량에서 발생하는 화재 시 케이블에 발생하는 온도변화를 검토하였다. 이를 위해 케이블교량에서의 화재를 적절히 모사할 수 있는 화재강도모델을 제안하였다. 화재강도모델은 각 차량 종류별로 열방출율을 실험결과 및 연구결과를 통해 설정하였다. 또한 설정된 화재강도모델을 사용하여 대상교량의 케이블부재의 열전달 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 대상교량에 최소 단면적 케이블과 최대 단면적 케이블의 열전달 해석 결과 단면적이 작은 케이블에서 더 높은 온도변화를 나타낸다. 이는 열 유속이 단위면적당 단위 시간에 발생하는 열량이기 때문에 동일한 열 유속이 재하되었을 때 단면적이 작은 케이블에 열전달이 더 활발하게 발생된 것으로 판단된다.
- (2) 차량 종류별 최대 열 유속(갓길에서의 화재)을 적용하였을 때 유조차 화재가 최소 단면적 케이블에 발생되었을 때를 제외하고는 모두 300℃ 미만의 온도변화를 보인다. 유조차 화재가 최소 단면적 케이블에서 발생될 때 최대

약 385℃까지 온도가 상승하며, 1시간 화재가 지속되었을 때에도 약 360℃의 온도분포를 나타낸다.

- (3) 각 차선(1~3차선 및 갓길)에서 발생하는 유조차 화재의 최대 열 유속을 최소 단면적 케이블에 적용하였을 때 갓길을 제외하고는 모두 300℃미만의 온도변화를 나타낸다.
- (4) 유조차 화재가 갓길에서 발생되었을 때 최소 단면적 케이블에 발생하는 높이 별 최대온도를 검토하였을 때 화재가 30분 경과하였을 때 노면으로부터 약 14m까지 300℃이상의 온도가 발생되며, 화재가 1시간 지속되었을 때에도 노면으로부터 약 14m까지 300℃이상의 온도가 발생된다. 따라서 대상교량에 위와 같은 화재가 발생될 때 PTI(2012)에서 제시하는 기준을 만족하기 위해서는 300℃이상의 온도가 발생하는 위치에 내화 보강 또는 관련 대책이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구결과를 토대로 케이블교량에서 화재가 발생될 때 케이블부재에 발생하는 온도변화에 대한 간접적인 평가가 가능한 것을 확인하였다.

본 연구에서는 화재 발생 시 바람에 의한 영향을 고려하지 않고 열 유속을 산정하였다. 바람에 의한 영향을 고려할 경우 화염의 높이 및 대상 물체와 화염 사이의 거리가 달라지기 때문에 바람에 의한 영향을 고려하지 않는 경우와 비교하였을 때 대상 물체의 온도가 상승 또는 하강할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 향후 바람에 의한 영향을 고려한 열전달 해석을 통해 본 연구결과와의 비교·분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 화재가 발생되어 케이블의 온도가 상승되었을 때 교량의 사용성에 초점을 맞춘 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 “케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설 공법 개발(No.19SCIP-B119963-04)” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- ABAQUS (2016) *ABAQUS v2016 User's Manual*, Dassault Systems, Simulia Corporation, Providence, Rhode Island, USA.
- ACI Committee 216 (1989) *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements*, ACI 216R-89, American Concrete Institute, Detroit.

- Beyler, C.L.** (2002) Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires, in DiNenno, P. J. et al. (Ed) *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd ed.)*, Quincy, MA: National Fire Protection Association, pp.3-268~3-314.
- EN 1993-1-2:2005** (2005) *EUROCODE 3: Design of Steel Structures-Part 1-2: General Rules, Structural Fire Design*, Stage 49 Draft, Brussels: European Committee for Standardisation.
- Gil, H., Cho, J.** (2012) Damage Cases of Highway Bridge due to Fire, *Proc. 2012 KSCE Conference*, KSCE, pp.1415~1418.
- Grant, G.B., Drysdale, D.D.** (1997) Estimating Heat Release Rates from Large-scale Tunnel Fires, *Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium*, Melbourne, Australia, pp.1213~1224.
- Heselden, A.** (1976) Studies of Fire and Smoke Behavior Relevant to Tunnels, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, Cambridge, UK, pp.J1-1~J1-18.
- Heskestad, G.** (1983) Luminous Height of Turbulent Diffusion Flames, *Fire Saf. J.*, 5, pp.103~108.
- Ingason, H., Gustavsson, S., Dahlberg, M.** (1994) *Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires*, SP Report 1994:08, Swedish National Testing and Research Institute.
- Ingason, H., Li Y.Z.** (2017) Spilled Liquid Fires in Tunnels, *Fire Saf. J.*, 91, pp.399~406.
- Ingason, H., Lonnermark A.** (2005) Heat Release Rates from Heavy Goods Vehicle Trailer Fire in Tunnels, *Fire Saf. J.*, 40, pp.646~668.
- Karlsson, B., Quintiere, B.G.** (2000) *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.
- Kim, S.S.** (2011) *A Study on Fire-Resistance Cover for Cable Bridge*, Master Thesis, Jeonju University, Republic of Korea.
- Kim, Y.J., Park, Y.H., Park W.G.** (2013) A Numerical Analysis on Fluid and Heat Transfer in an Electric Oven, *Proc. KSOFE 2013 Spring Annual Conference*, KSOFE, pp.78~83.
- Korea Expressway Corporation** (2013) *Exploring of Fire Resistance Design of Bridge Substructure and Underneath Structure*, Korea Expressway Corporation.
- Kunikane, Y., Kawabata, N., Ishikawa, T., Takekuni, K., Shimoda, A.** (2002) Thermal Fumes and Smoke Induced by Bus Fire Accident in Large Cross Sectional Tunnel, *The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference*, Nagoya, Japan.
- Lemair, T., Kenyon, Y.** (2006) Large Scale Fire Tests in The Second Benelux Tunnel, *Fire Technol.*, 42, pp.329~350.
- Liew, S., Deaves, D.** (1992) Safety Assessment of Dangerous Goods Transport in a Road Tunnel, *Proceedings of the First International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Basel, Switzerland, pp.227~237.
- Mangs, J., Keski-Rahkonen, O.** (1994) Characterization of the Fire Behaviour of a Burning Passenger Car. Part 1: Car Fire Experiments, *Fire Saf. J.*, 23, pp.37~49.
- National Fire Data System** statistics from 2018. 01.01.~2019.01.01. (Internet) Available: <http://www.nfds.go.kr/stat/them.do>
- NFPA 502** (2004) *Standard for Road Tunnels, Bridges, and other Limited Access Highways*, NFPA 502, 2004 ed.
- PIARC** (1999) *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, PIARC, 05.05B-1999.
- PTI** (2012) *PTI DC45.1.1-12: Recommendations for Stay-Cable Design, Testing, and Installation*, PTI, Farmington Hills, MI.
- Shokri, M., Beyler, C.L.** (1989) Radiation from Larger Pool Fires, *SFPE J. Fire Prot. Eng.*, 4, pp.141~150.
- Yoo, Y.H., Kim, H.Y., Shin, H.J.** (2007) A Study on the Vehicle Fire Property Using the Large Scale Calorimeter, *J. Korean Tunn. & Undergr. Space Assoc.*, 9(4), pp.343~349.

요 지

교량에서의 화재는 최근까지도 빈번하게 발생되고 있으며, 특히 케이블교량에서 화재가 발생될 시 케이블에 높은 온도상승으로 인해 케이블에 손상 및 파단이 발생될 수 있다. 본 연구에서는 케이블교량에서 발생될 수 있는 화재 시나리오를 설정하였다. 또한 실물차량 화재실험 결과를 토대로 화재강도모델을 제안하여 대상교량 케이블의 열전달 해석을 수행하였다. 해석 결과 단면적이 작은 케이블에서 더 높은 온도상승이 발생되며, 유조차를 제외한 차종의 경우 내화 성능 기준을 초과하지 않는 결과를 나타내었다. 유조차 화재의 경우 갯길에서 발생될 때 최소 단면적 케이블에서 내화 성능 기준을 초과하는 결과를 보이며, 기준을 초과하는 케이블의 높이는 약 14m로 나타나 이에 따른 대책 및 내화 보강의 필요성을 확인하였다. 본 연구결과를 통해 케이블교량에서 화재가 발생될 때 케이블의 온도변화에 대한 간접적인 평가가 가능한 것을 확인하였으며, 향후 화재 발생 시 바람에 영향을 고려한 열전달 해석과 케이블의 온도상승 시 교량의 사용성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 케이블교량, 화재, 화재강도모델, 열전달 해석