화재시뮬레이션에 의한 보 인접 스프링클러헤드의 동작시간 분석에 관한 연구

A Study on Analyzing the Operation Time of the Sprinkler Head near the Beam with Fire Simulation

최대현* · 이재문** · 민세홍***

Choi, Daehyun*, Lee, Jaemoon**, and Min, Sehong***

Abstract

In this study, the dangers surrounding vehicular fires were identified by means of statistical analysis of the national fire information system. The analysis was conducted on the operation time of the sprinkler fire extinguisher, which plays the most essential role during the initial fire extinguishing attempt, in case of a fire outbreak. A simulation was created using the application guidelines pertaining to a sprinkler head located close to a beam as provided in NFSC 103. The operation time of the sprinkler head was analyzed for the case of a parking lot fire where a fan was operated. Fire Dynamics Simulator was used as the simulation program. If the revised guidelines were applied to the simulation, the sprinkler head located directly above the fire source was activated approximately 1 min in advance compared to the sprinkler head operating under current standards. Therefore, it was found that the revised guidelines were suitable and aided in early fire extinguishing attempts. In the case where a fan was operated along with the detector, during the outbreak of a fire, it was found that the operation of the sprinkler head located directly above the fire was delayed by two or more minutes compared to the simulated case where no fan was operated.

Key words : Underground Parking Lot, FDS, Sprinkler Head, Beam, Operation Time

요 지

본 연구에서는 국가화재정보시스템의 화재통계 분석을 통해 차량화재의 위험성에 대하여 파악하였으며, 화재발생시 초기소화의 가장 중요한 역할을 하는 스프링클러 소화설비의 동작에 대한 분석을 수행했다. 시뮬레이션은 NFSC 103에서 보와 가까운 스프링클러헤드 설치기준에 대하여 현행기준과 개정지침을 구분하여 시나리오를 구성하였으며, 추가적으로 주차장 화재발생시 FAN을 기동할 경우 스프링클러헤드의 동작시간에 대해 분석했다. 시뮬레이션 프로그램으로 FDS를 사용하였으며, 시뮬레이션 결과 개정지침을 적용할 경우 화원 직상부의 스프링클러헤드가 현행기준에 대한 결과와 비교하여 약 1분 먼저 동작하여 개정지침의 적용이 적절함을 확인하였다. 화재발생시 감지기에 의해 FAN을 동작시킬 경우 직상부 스프링클러헤드는 FAN이 동작하지 않았을 때의 시뮬레이션 결과와 비교하여 2분 이상 동작이 지연됨을 확인하였다.

핵심용어 : 지하주차장, FDS, 스프링클러헤드, 보, 동작시간

1. 서 론

급격한 도시화로 인구는 도시로 집중되는 경향을 보이고

있으며, 과포화된 인구를 분산시키기 위하여 신도시의 개발 등이 이루어지고 있다. 이에 따라 타 지역으로 이동을 위한 차량의 이용이 보편화되었고, 늘어난 차량의 주차문제를

*정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 석사과정(E-mail: candk1003@naver.com)

Member, Master Course, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

**정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 석사(E-mail: dddcom@daum.net)

Member, Master Degree, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

***교신저자, 정회원, 가천대학교 설비·소방공학과 교수(Tel: +82-31-750-5714, Fax: +82-31-750-8749, E-mail: shmin@gachon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University

해결하기 위하여 과밀집된 도시의 고층 건축물에는 지하에 대규모로 주차장을 확보하는 경향을 보인다.

국가화재정보시스템 NFDS (NFA, 2019a, 2019b)를 통해 1990년부터 2018년까지의 화재 통계 데이터를 분석을 진행한 결과, Fig. 1과 같이 1990년부터 2018년까지 전체 화재 건수와 차량화재 발생 건수를 비교하였을 때 2003년에 약 19.28%로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 최근에 들어서는 전체 화재발생 건수의 증가로 차량화재 발생 비율이 감소하는 양상을 보이지만 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 차량화재 발생 건수는 1990년 2,120건에서 계속해서 증가하여 2000년대 이후에는 해마다 약 5,000여건을 상회하는 추이를 보이고 있다.

Fig. 1. Fire Statistics of All and Vehicle Fires

Fig. 2는 1990년부터 2018년까지 차량화재로 발생한 재산 피해를 비교한 그래프로 크게 증가하는 경향을 보이며, 2018년에 발생한 재산피해는 1990년 발생한 재산피해 대비 약 1,200%가 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 2. Property Damage from Vehicle Fire

현행 소방법에서는 화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령 별표5에 따라 제연설비의 설치대상에 대해 규정하고 있으나, 지하주차장은 제연설비 설치 대상에 포함되지 않는다. Youn (2019)에서 언급한 바와 같이 최근에는 공조겸용설비를 설치하는 대상물에

대하여 성능위주설계시 화재가 발생할 경우 환기횟수를 6회 이상으로 하거나 27 CMH/m² 이상으로 적용하고 있으나, 지하주차장에 대한 정확한 기준은 전무한 실정이고, 설계 시에도 화재발생시 환기설비의 동작을 멈추게 하였으나, 연기의 배출을 위해 FAN을 동작하도록 하고 있다.

Lee (2016)에서 확인할 수 있듯이, 지하주차장에서 화재가 발생하게 될 경우 외기와 면하는 면적이 적은 지하 공간의 특성상 화재로부터 대피 및 화재 진압이 매우 어려우며, 주차장의 위치가 깊어질수록 더욱 위험할 수 있다. 따라서 주차장에서 발생하는 화재는 초기진압이 무엇보다 중요하다고 할 수 있으며, 밀폐된 공간에 대한 신속한 연기 배출이 이루어져야 한다.

이에 스프링클러설비의 화재안전기준 제10조제8항 주차장 등 보와 가까운 스프링클러헤드 설치기준이 지침으로 개정되었으며, 본 연구에서는 화재시뮬레이션을 통하여 주차장에서 차량화재 발생 시 스프링클러 헤드의 동작시간에 대하여 현행기준과 개정지침을 비교·분석했다.

화재시뮬레이션 프로그램으로는 Fire Dynamics Simulation (FDS)를 적용하였으며, FDS는 Kim et al. (2019)에서 언급한 바와 같이 미국 국립표준기술 연구소 National Institute of Standards and Technology (NIST)의 부설 건축화재연구소인 Building and Fire Research Laboratory (BFRL)에서 제공하는 화재시뮬레이션 프로그램으로, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 Navier-Stokes 방정식(저속 열 유동장)을 기본 이론으로 한다.

2. 지하주차장 화재모델링

2.1 화재시뮬레이션 모델링 입력 값

시뮬레이션은 지하 주차장을 대상으로 진행하였으며, 주차장의 건축물 형태는 직사각형 구조이다. 주차장의 크기는 가로 측 최대 길이가 50.4 m이며 세로 측 최대 길이는 40.2 m, 높이는 3.0 m이며, 주차장에 설치된 보의 높이는 0.6 m이다.

화재는 주차장에 주차한 차량의 엔진부에서 발생한 것으로 가정했다. 화재성장모델은 NFPA 92B (2009)에 따라 t^2 화재의 화재성장속도를 적용하였으며, $Q = \alpha t^2$ 으로 하여 151초에 약 1,000 Btu/sec (1055 kW)에 도달하는 Medium 화재로 가정하여 적용하였을 때 α 값은 0.04627로 도출되었다. 이에 따라 최대 열방출율(Peak HRR)은 SFPE Handbook 5판(Hurley et al., 2015)을 참조하여 430초에 8.5 MW에 도달하는 것으로 설정하였다. 시뮬레이션의 분석 시간은 최대 열방출을 도달시간을 고려하여 450초까지 분석을 진행하였다.

Table 1은 화재시뮬레이션 모델링에 적용하는 입력 데이터 중 발화원, 최대 열방출율, 반응물질, 분석시간, 데이터 측정 Device, 감지기 등에 대한 내용을 나타냈다.

Table 1. Input Value for Fire Simulation

Item	Input Value
Ignition Source	1 Car
Max HRR	8.5 MW
Reaction	Polyurethane_GM25
CO Yield	0.028
Soot Yield	0.194
Analysis Time	450 sec
Device Location	14
Detector	Heat Detector

Fig. 3과 같이 주차장에서 공조설비가 동작했을 때의 풍속을 적용하기 위하여 풍속측정장비를 이용하여 실제 주차장에서 풍속측정을 진행하였으며 측정 결과로 0.2 m/s를 화재시물레이션 시나리오에 적용하였다. 또한, 주차장 배연에 필요한 풍량은 건축물의 설비 기준 등에 관한 규칙 제11조제4항 관련 별표 1의 6 자 목에서 규정하는 환기량 27 CMH/m²를 적용하였다.

Fig. 3. Wind Speed Measurement

Table 2는 스프링클러헤드의 모델링에 적용하는 입력데이터 중 방수량, 작동온도, 응답시간지수, C Factor에 대한 내용을 나타내었다.

Table 2. Input Value for Sprinkler Head

Item	Input Value
Discharge Flow Rate	80 L/min
Activation Temperature	68 °C
Response Time Index	100
C Factor	1.5

스프링클러 헤드는 발화원을 중심으로 총 14개소에 설치하였으며, Figs. 4와 5는 화재시물레이션 모델링 구축도이다.

Fig. 4. Modeling for Underground Parking Lot

Fig. 5. Modeling for Sprinkler Head Placement

보와 인접한 헤드인 SP1, SP4, SP5, SP8, SP11, SP12를 제외한 나머지 헤드는 스프링클러 헤드와 그 부착면과의 거리에 대한 화재안전기준의 규정에 따라 0.3 m로 설정하였으며, 보와 인접한 헤드는 화재시물레이션 시나리오에 따라 구분하여 설정하였다.

2.2 화재시물레이션 시나리오

현행 스프링클러설비의 화재안전기준 제10조제8항은 보의 높이가 55 cm를 초과할 때 보의 하단 측면 끝부분으로부터 스프링클러헤드까지의 거리가 스프링클러헤드 상하간거리의 1/2 이하가 되는 경우 스프링클러헤드와 헤드 부착면간의 거리를 55 cm 이하로 규정하고 있다. 이 경우 보 직하부에서 발생한 화재에 대해 스프링클러헤드 동작시간이 지연됨에 따라 기준규정이 개정 예정이며, 적용지침은 스프링클러헤드와 부착면간의 거리를 30 cm 이하로 규정한다. 본 연구에서는 화재시물레이션을 통하여 현행기준과 개정지침 적용 시 스프링클러헤드의 동작시간에 대한 비교·분석하였으며, 추가적으로 주차장 화재발생시 동작하는 FAN이 직상부 스프링클러헤드의 동작 시간에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

시나리오 1은 보 직하부의 차량에서 화재가 발생했을

때 보에서 가장 인접한 스프링클러헤드의 부착면으로부터 수직거리에 따른 헤드의 동작시간에 대한 차이를 분석하였으며, 시나리오 2에서는 시나리오 1에 비교하여 좀 더 현실적인 환경에 대한 시뮬레이션을 진행하기 위하여 개정지침에 대하여 공조설비가 동작했을 때와 감지기의 동작에 따라 FAN이 동작했을 때 직상부 스프링클러 헤드가 동작하는데 걸리는 시간을 비교·분석했다. 이 때, FAN의 동작 방향은 화재로 인해 발생한 연기가 보를 기준으로 직상부 헤드의 반대쪽으로 넘어갔을 때 헤드의 동작시간을 분석하기 위하여 Fig. 6과 같이 차량의 앞쪽에서 뒤쪽 방향으로 설정했다.

Fig. 6. FAN Operation Direction

Table 3은 시나리오 1, 2, 3에 대한 내용을 정리하여 나타내었다.

Table 3. Fire Simulation Scenario

Scenario	Case	Setting Value	
Scenario 1	S1_1	Vertical distance from Ceiling	0.55 m
	S1_2	Vertical distance from Ceiling	0.3 m
Scenario 2	S2_1	Vertical distance from Ceiling	0.3 m
		FAN Operation	X
		Velocity	0.2 m/s
	S2_2	Vertical distance from Ceiling	0.3 m
		FAN Operation	O
		Capacity	27 CMH/m ²

시나리오 1의 S1_1은 현행 기준으로 스프링클러헤드와 헤드 부착면간의 거리를 0.55 m로 적용하였으며, S1_2는 개정지침을 적용하여 스프링클러헤드와 헤드 부착면간의 거리를 0.3 m로 적용했다.

시나리오 2는 FAN의 동작 여부에 따라 구분하였으며, S2_1, S2_2 모두 개정지침인 0.3 m를 적용하였다.

FDS의 Mesh Cell Size는 원활한 시뮬레이션의 수행을 위해 Multi Mesh를 사용하였으며, 스프링클러헤드를 배치한 영역과 나머지 영역으로 구분하여 Cell의 크기를 다르게 설정하였다. 스프링클러헤드가 설치된 영역은 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m로 설정하였으며, 이외의 영역은 0.3 m × 0.3 m × 0.3 m로 Mesh Cell Size를 설정하였고, Cell의 총 개수는 636,960개로 설정하였다.

3. 화재시뮬레이션 결과분석

3.1 시나리오 1

시나리오 1은 개정되는 기준에 대한 적정성 여부에 대해 판단하기 위하여 스프링클러헤드 설치 높이에 따른 반응속도의 차이를 확인하는 것을 주안점으로 두었으며, 이에 따라 무풍으로 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 4는 S1_1, S1_2 시나리오의 화재시뮬레이션 결과를 비교한 것으로 시간에 따른 스프링클러 헤드의 온도변화에 대한 그래프와, 화원의 직상부 헤드인 SP5, SP12가 동작했을 때의 이미지, 각 시나리오별로 동작한 헤드의 개별 동작시간에 대하여 나타냈다.

시간에 따른 스프링클러헤드의 온도변화 그래프에서 상승하던 온도가 수직 하강하여 20 °C에 도달한 지점은 스프링클러헤드가 동작한 지점으로 작동온도인 68 °C에 도달한 뒤 헤드가 개방되어 온도가 하강한 것을 의미한다.

시뮬레이션의 결과 S1_1 시나리오는 450초의 시뮬레이션 분석시간 중 14개의 스프링클러헤드에서 5개의 헤드가 동작하였으며, SP13, SP6, SP12, SP5, SP3의 순서로 동작했다. S1_2 시나리오에서는 S1_1과 동일하게 14개의 스프링클러헤드 중 5개의 헤드가 동작하였으며, SP13, SP12, SP5, SP6, SP10의 순서로 동작했다. 공통적으로 동작한 헤드는 SP5, SP6, SP12, SP13으로 보를 기준으로 영역을 구분한다고 할 때, 화원의 직상부 및 직상부 근처의 헤드는 모두 동작하는 것으로 나타났다.

화재가 발생할 경우 천장면으로 Ceiling Layer가 형성되고, 계속해서 화재가 진행됨에 따라 Ceiling Layer가 천장면에서 아래 방향으로 점차 두꺼워지게 되는데, S1_1, S1_2 두 가지 시나리오 모두 SP13이 가장 먼저 동작하는 것으로 나타났다. Smoke View 확인 결과, 이는 발생한 연기가 보에 굴절되어 직상부에 비해 Ceiling Layer가 비교적 먼저 축적되었으며, 직상부 헤드인 SP5, SP12보다 먼저 동작한 것으로 판단되었다.

Fig. 7은 S1_1, S1_2의 화원 직상부 헤드의 반응시간을 비교한 것이다. SP5는 S1_1 시나리오에서는 308초에 동작하였으며, S1_2 시나리오에서는 239초에 동작하여 개정지침이 현행기준보다 69초 일찍 동작하는 것으로 분석됐다. SP12는 S1_1 시나리오에서는 292초에 동작하였으며, S1_2 시나리오에서는 233초에 동작하여 개정지침이 현행기준보다 59초 일찍 동작하는 것으로 분석됐다.

Table 4. S1_1, S1_2 Simulation Result Analysis

Division	S1_1		S1_2	
Sprinkler Head Temperature Change
SP12 Operation
SP5 Operation
Operation Time of Sprinkler Head	SP3	451 sec	SP5	239 sec
	SP5	308 sec	SP6	256 sec
	SP6	244 sec	SP10	441 sec
	SP12	292 sec	SP12	233 sec
	SP13	218 sec	SP13	218 sec

Fig. 7. S1 Operation Time Comparison for SP5, SP12

SP5, SP12 모두 개정지침을 적용한 것이 현행기준에 비교하여 약 1분 먼저 동작하는 것으로 나타났으며, 이는 스프링클러헤드의 설치위치를 더 높임에 따라 축적되는 Ceiling Layer에 먼저 반응하여 나타난 결과로 판단된다.

3.2 시나리오 2

시나리오 2는 개정지침에 대하여 공조설비가 작동하고 있을 때와 화재감지로 인해 FAN이 동작하고 있을 때의 보 인근 스프링클러헤드의 동작하는 시점을 확인하는 것을

주안점으로 두고 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 5는 S2_1, S2_2 시나리오에 따른 화재시뮬레이션 결과를 비교한 내용으로 각 시나리오의 스프링클러헤드의 온도변화에 대한 그래프와 회원 직상부 헤드인 SP5, SP12가 동작하였을 때의 사진, 스프링클러헤드의 동작시간, 열감지기의 동작시간에 대하여 나타냈다.

S2_1 시나리오의 결과는 스프링클러헤드의 온도변화에 대한 결과 그래프와 SP5, SP12의 동작사진에서 확인할 수 있듯이 공조설비가 동작했다고 해도 그 풍속이 미약하여

Table 5. S2_1, S2_2 Simulation Result Analysis

Division	S2_1		S2_2	
Sprinkler Head Temperature Change				
SP12 Operation				
SP5 Operation				
Operation Time of Sprinkler Head	SP3	438 sec	SP1	285 sec
	SP5	228 sec	SP2	312 sec
	SP6	222 sec	SP4	198 sec
	SP9	445 sec	SP5	401 sec
	SP10	444 sec	SP6	395 sec
	SP12	224 sec	SP9	277 sec
	SP13	269 sec	SP10	435 sec
Operation time of Heat Detector	-		143 sec	

S1_2의 결과와 비슷한 양상을 보인다. 시뮬레이션 분석시간 450초 동안 14개의 스프링클러헤드 중 7개의 헤드가 동작하였으며, 헤드는 SP6, SP12, SP5, SP13, SP3, SP10, SP9의 순서로 동작했다.

S2_2에서는 열감지기를 설치하여 감지기의 화재감지와 동시에 FAN을 27 CMH/m²의 풍량으로 동작시키는 것으로 시뮬레이션을 진행했다. 시뮬레이션 결과, 열감지기가 143초에 화재를 감지하여 FAN이 동작하였으며, Smoke View의 확인 결과, 순간적으로 연기가 차량의 뒤쪽으로 밀려 화원의 직상부 영역으로는 연기가 원활하게 축적되지 않는 것으로 나타났다. 이 후 화재가 계속해서 진행됨에 따라 화원의 직상부 영역에도 연기가 축적되기 시작했으며, 이에 따라 14개의 스프링클러헤드 중 10개의 헤드가 동작하였고, SP4, SP11, SP9, SP1, SP2, SP12, SP6, SP5, SP13, SP10의 순서로 동작했다.

S2_2 시뮬레이션의 결과로 화원의 직상부 보의 반대쪽 영역에서는 SP3, SP8을 제외한 모든 스프링클러헤드가 동작하였으며, S2_1의 결과와 비교하여 더 많은 개수의 헤드가 동작하였는데, 이는 FAN의 동작이 보의 뒤쪽 영역의 연기 축적을 촉진시켰으며, 이로 인해 Ceiling Layer의 성장을 도운 것으로 확인하였다.

Fig. 8은 S2_1, S2_2의 화원 직상부 헤드의 반응시간을 비교한 것이다. SP5는 S2_1 시나리오에서 228초에 동작하였으며, S2_2 시나리오에서는 401초에 동작하여 FAN이 동작했을 때 헤드의 동작시간이 173초 지연되는 것으로 나타났다. SP12는 S2_1 시나리오에서 224초에 동작하였으며, S2_2 시나리오에서는 360초에 동작하여 FAN 동작으로 인해 헤드의 동작시간이 136초 지연되는 것으로 나타났다.

S2 시나리오에 대한 시뮬레이션 분석 결과, 감지기의 작동과 동시에 FAN을 동작시킬 경우, Ceiling Layer를 빠른 속도로 성장시켜 스프링클러헤드의 동작개수가 증가하였으나, 화원의 직상부 헤드의 경우 동작시간을 약 2~3분 지연시켜 초기소화에는 실패한 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구를 통해 지하주차장에서 화재발생시 보에 인접한 스프링클러헤드의 반응시간에 대하여 두 가지 시나리오에 대하여 분석했다. 먼저, 현행 화재안전기준과 수정된 설치기준을 비교 및 분석하였으며, 두 번째로, 수정된 설치기준에 대해 공조설비가 동작했을 때와 연기배출을 위해 FAN이 동작했을 때 보 인접 스프링클러헤드의 반응시간에 대해 비교·분석했다.

- (1) 현행기준과 개정지침에 대한 화재시뮬레이션을 통한 비교·분석 결과, 현행기준인 S1_1 시나리오에서는 SP12가 화재발생 292초 후에 동작했으며, 개정지침에 대한 시나리오인 S1_2에서는 SP12가 233초에 동작하는 것으로 나타났다. 시나리오 1의 결과를 종합 분석한 결과, 스프링클러헤드와 부착면간의 거리를 개정지침에 따라 0.55 m에서 0.3 m로 좁게 할 경우 화원 직상부의 헤드가 동작하는 데 걸리는 시간이 59초로 약 1분 먼저 동작하는 것으로 나타났다. 이는 Ceiling Layer가 천장면으로부터 성장함에 따라 더 높은 위치에 설치된 헤드가 먼저 동작한 것으로 분석되었으며, 시뮬레이션 수행 결과, 개정지침을 적용할 경우 현행기준에 비교하여 보다 초기에 소화할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 개정지침을 적용하여 공조설비가 동작했을 때와 연기의 배출을 위해 FAN이 동작했을 때를 비교·분석한 결과, 공조설비가 동작했을 때의 시나리오인 S2_1의 결과 SP12가 224초에 동작하였으며, FAN이 동작했을 때의 시나리오인 S2_2의 결과 143초에 감지기가 동작하여 연기의 배출을 위해 FAN이 동작하였고, 그 결과로 SP12가 360초에 동작했다. 시뮬레이션의 결과로 FAN이 동작했을 때 화원 직상부 스프링클러헤드가 136초 늦게 동작하는 것으로 나타났다. 시나리오 2의 결과로 화재 감지와 동시에 FAN이 동작할 경우 기류

Fig. 8. S2 Operation Time Comparison for SP5, SP12

에 의해 화원 이외 장소에 Ceiling Layer가 먼저 형성됨에 따라 다수의 헤드가 동작하여 수원이 낭비될 수 있음을 확인하였다. 또한, FAN을 동작시킬 경우 직상부의 스프링클러헤드가 동작하는 데 약 2분이 더 소요되는 것을 통해 기류에 의해 화원에 직접적인 살수가 늦어지는 것과, 이에 따라 초기소화가 더욱 어려워질 수 있음을 확인하였다.

- (3) 시뮬레이션을 통해 FAN을 동작시킬 경우 Ceiling Layer의 형성을 방해하여 화원의 직상부 헤드의 동작을 지연시키는 것을 확인하였다. 따라서, 연기의 배출을 위하여 FAN을 구동시킬 경우 감지기를 통해 화재를 감지하였다고 하더라도 화원 직상부의 스프링클러헤드 동작에 방해가 되지 않을 만큼의 지연시간이 필요함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2018년 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임(GCU-2018-0697).

References

Hurley, M.J., Gittuk, D., Hall Jr., J.R., Harada, K., Puchovsky, M., Torero, J., et al. (Ed.). (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed.). Springer.

Kim, J.B., Lee, J.M., and Min, S.H. (2019). Study of reliability of the FDS fire model by verification experiments. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 1, pp. 197-203.

Lee, J.M. (2016). *A study on the method of smoke control using fire dynamic simulation in large scale underground parking lot*. Master's thesis, Gachon University.

National Fire Agency (NFA). (2019a). *Fire statistics of all and vehicle fires (1990-2018)*. National Fire Data System (NFDS). Retrieved from <https://nfds.go.kr/>

National Fire Agency (NFA). (2019b). *Property damage from vehicle fire (1990-2018)*. National Fire Data System (NFDS). Retrieved from <https://nfds.go.kr/>

NFPA 92B. (2009). *Standard for smoke management systems in malls, atria and large spaces*. National Fire Protection Association.

Youn, H.K. (2019). *A study on the optimal measures for the smoke control performance of underground parking lot*. Ph.D. dissertation, Kyonggi University.

<i>Received</i>	December 5, 2019
<i>Revised</i>	December 6, 2019
<i>Accepted</i>	December 20, 2019