

화재의 크기와 종류에 따른 선박 피난 안전 연구

김원욱 · 김대희*

(한국해양수산연수원 · *(주)삼우이머전)

A Study on Ship Evacuation Safety Consequent on the Size and Sort of Fire

Won-Ouk KIM · Dae-Hee KIM*

(Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology · *SAMWOOimmersion Co., Ltd)

Abstract

Maritime accidents caused by a ship include collisions, sinking, stranding and fire etc. This study is intending to consider fire accidents among such diverse marine accidents. It is much likely that various sorts of fires break out because crewmen are living in a narrow space for long periods of time consequent on the ship's characteristic of sailing on the sea. According to the ship fire survey, about 50% of the total fire accidents occurred at an engine room, and the main fire origin was analyzed to be oil. In addition, ship fire breaks out in the order of baggage racks and living quarter. In short, the survey indicates that all sorts of fires belonging to A, B, C and D-class have occurred. This study, targeting an actual passenger ship 'A', found the response time to evacuation, during which the people on board a ship recognize the outbreak of fire, and act, and the travel time for evacuation which is the actual travel time. In addition, this study carried out a simulation through the special program for fire analysis - FDS (Fire Dynamics Simulator) in order to find the effective evacuation time, i.e. life survival time. Particularly, this study did comparative analysis of the influence on the survival of passengers and crew based on the collected simulation data by fire size and sort. As a result of the analysis, it was found that when examining the only actual evacuation movement time excepting the response time to evacuation, people are safe by completing evacuation before the effective evacuation time only in case fire size is 100Kw among all sorts of fires. In other words, in case of the outbreak of fire more than 1 MW, it was found to fail to meet evacuation safety regardless of fire size.

Key words : Maritime accident, Fire, Passenger and crew, Response time to evacuation, FDS, Evacuation movement time

I. 서론

선박에 의한 해양사고에는 충돌, 접촉, 좌초 및 화재 등이 있다. 이러한 다양한 사고 중 이 연구에서는 선박의 화재사고가 인명 생존에 미치는 영향에 대해 고찰한다. 선박은 그 특성상 장시간

해상에서 승객 및 승무원들이 생활하면서 운항하기 때문에 다양한 종류의 화재 발생 가능성이 높다. 조사에 의하면 전체 선박 화재사고의 약 50%가 기관실에서 발생하며 이때 주 화원은 유류였다. 그리고 화물창과 거주구역의 순으로 발생하는 것으로 나타났다. 즉, A, B, C, D급의 모든 중

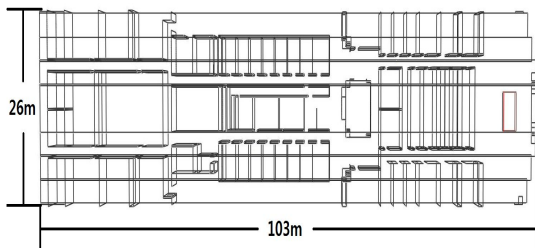
† Corresponding author : 051-629-6467, kdavid73@gmail.com

* 본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MPSS-해경-2016-06]

류의 화재가 다양하게 발생하고 있다. 주목할 사항은 화재의 크기와 종류에 따라 화재 성장에 차이가 있다는 것이다. 즉, 목재화재에 비해 유류화재는 성장이 빨라 인명 생존 가능시간의 기준인 대피허용한계값에 도달하는 시간이 단축될 것이다. 이 연구에서는 실제 여객선 A호를 모델링하여 다양한 화재의 종류와 크기를 화재분석 전문 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator, 이하 FDS)를 통해 시뮬레이션을 수행하고 이 데이터를 이용하여 승객 및 선원들의 생존율에 미치는 영향을 비교분석하였다.

II. 피난 안전성 검토

이 장에서는 실제 피난에 소요되는 시간인 필요피난시간을 이론식에 의해 구하고자 한다. 피난시간은 반응시간(Evacuation Response time) + 피난이동시간(Evacuation Movement time)으로 반응시간은 화재알람 및 신고를 통해 인지하고 행동하는 단계를 말한다(Choi J. H 2016). 선박 피난에 대한 피난반응시간에 대한 선행연구가 거의 없는 실정이므로 이 연구에서는 일본 건설성 고시에 의한 피난반응시간을 인용하며 그 식은 식(1)에 의해 구해진다(Kim M. K et. al.). 대상선박은 여객선 A호로 Fig. 2에서 보는 바와 같이 길이 103m, 폭 26m, 높이 2.3m 그리고 복도 및 피난구 폭은 1.3m이다. 승선인원은 세월호 사고를 참조하여 총 350으로 정하였다.



[Fig. 1] Drawing of passenger ship "A"

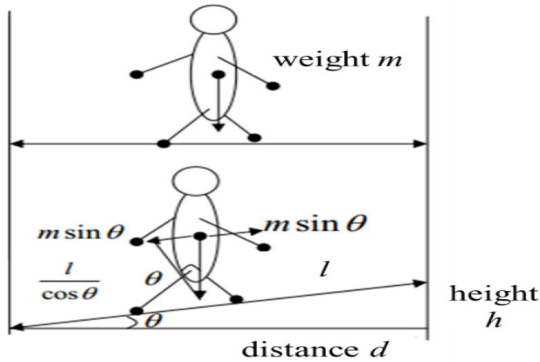
피난반응시간은 식(1)에 의해 계산되며 이 식을 이용하여 여객선 A호를 대상으로 계산하면 약 6.7(402초)분으로 계산된다.

$$t_{start} = \frac{\sqrt{A_{floor}}}{30} + 5(\text{min}) \quad \text{식(1)}$$

여기서, t_{start} : 피난반응시간(min), A_{floor} : 층 면적 (단위 : m^2)이다. 그리고 실제 피난에 필요한 시간인 피난이동시간은 미국의 SFPE(Society of Fire Protection Engineers)의 Harold E. "Bud" Nelson과 Frederick W. Mowrer의 비상 시 이동 연구의 피난계산방법에 의하여 계산하였다. 군중밀도가 0.54/m²미만일 경우 피난 완료시간 계산방법은 식(2)와 같다(KFPA, 2005). 단, 도면을 파악하여 유효면적은 전체면적의 약 1/2로 산정하였다.

$$t_p = \frac{P(\text{통과인원})}{(k - akD) W_e} \quad \text{식(2)}$$

여기서, t_p : 한 군중의 사람들이 비상구 통로상의 특정지점을 통과하는데 걸리는 시간(s), k : 피난 속도 상수 (복도, 비상구는 1.4 적용), a : 0.266 (상수), D : 군중밀도 [인원수(명)/유효면적(m²)], W_e : 출구 폭 (m)이다. a 는 피난속도 상수로 m/s 인 경우 0.266를 적용한다. 상수 이론식에 의한 피난이동시간은 약 207초로 검토되었다. 단, 선박의 경사 및 가시거리에 의한 보행속도 제한은 없는 것으로 계산하였으며 이때 피난구는 한 곳만 사용가능한 것으로 하였다. 즉, 피난시간은 반응시간인 피난반응시간과 피난이동시간의 합이므로 총 피난에 사용된 시간은 609초로 예상된다. 하지만 실제로는 경사각 및 가시거리 제한 등에 의해 피난시간이 증가할 것으로 예상된다. Galea의 연구에 의하면 경사각에 의한 보행속도 감소는 heeling이 20도인 경우 23% 감소되는 것으로 나타났다(Galea 2016). 그리고 satoh et al.,(2006)의 연구에 의하면 보행속도 감소를 [Fig. 2]에 이유로 설명하였다.



[Fig. 2] The definition of sloping road distance(l) using two values of horizontal distance (d) and height(h)

[Fig. 2]의 원리를 이용하면 식(3)과 같이 보행 속도 감소가 표현되는데 Galea의 연구와 거의 유사함을 알 수 있다.

$$l = \frac{d}{\cos\theta}(1 + \sin\theta) \quad \text{식(3)}$$

식(3)을 이용하여 선박이 충돌이나 좌초로 인해 횡경사가 생긴 경우 승객 및 승무원의 보행 속도 감소를 추정하여 피난이동시간을 구하면 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Decrease rate according to Evacuation time

Heeling(°)	Decrease rate (%)	Evacuation time
5	8.4	224.4
10	16.1	240.3
15	23.3	255.2
20	30.0	269.1
25	36.3	282.1
30	42.3	294.6

Ⅲ 화재 시뮬레이션

1. FDS의 개요

FDS는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치

해석을 수행하는 CFD 프로그램으로 열과 연기의 흐름에 특화되어 있어 필드에서 많이 사용되어진다. 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 또는 DNS(Direct Numerical Simulation)에 상관없이 보존방정식에 의해 예측된다. Navier-Stokes 방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{식(4)}$$

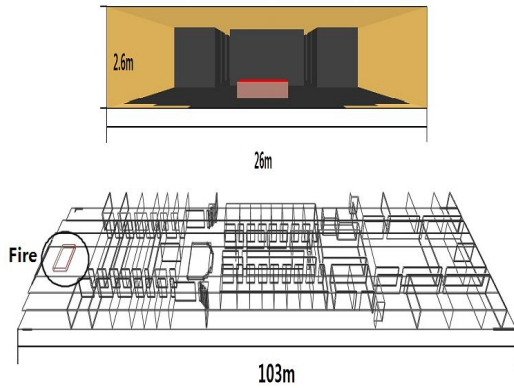
여기서, u : 속도, f : 단위체적당 걸리는 외력, ρ : 밀도, p : 압력, ν : 점성계수이다.

2. 화재 시뮬레이션

실제 여객선 A호의 도면을 이용하여 AutoCAD로 3차원 모델을 제작하였다. FDS를 사용하여 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 DXF 파일로 화재 구역을 제작해야하므로 AutoCAD를 이용하여 DXF 파일로 변환한 후 변환된 파일을 DXF2FDS 프로그램을 이용하여 FDS 전용 파일로 다시 변환하였다. 화재 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재공간의 재질, 화재의 크기 및 화재장소 등과 같은 다양한 조건과 변수가 필요하다. 이 시뮬레이션을 위한 물리적 조건은 아래와 같이 실제 선박인 여객선 A호를 적용하였으며 ISO 9705시험에서 최초 10분간은 100kW 그리고 1MW에서 플래쉬오버가 발생한다는 결과에 의해 시뮬레이션 시간은 10분 화재의 강도는 다양한 강도를 감안하여 100kW, 1MW, 2MW로 설정하여 수행하였다. 그리고 선박화재는 기관실, 화물창, 거주구역 순으로 약 90%이 발생하고 있다. 이 연구에서는 여객선이 대상으로 화물에 의한 화재는 제외하고 기관실 및 거주구역 화재의 주 회원으로 예상되는 목재, 유류, 플라스틱으로 설정하였다. 자세한 내용은 아래와 같다.

- Fire Space(X, Y, Z Axis) 103m × 26m × 2.8m
- Simulation Time 600 Seconds
- Fire Scale 100kW, 1MW, 2MW

- Size of Fire Source 5 m × 3 m
- Flammable Material Wood, Kerosene, Polystyrene
- Interior Temperature 25 °C

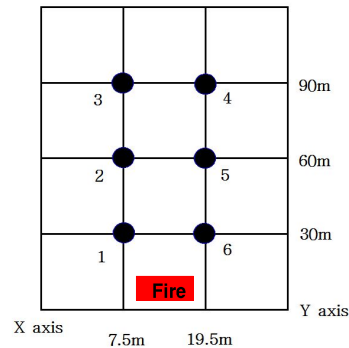


[Fig. 3] Simulation Area

화재 시 온도 및 가지거리 측정지점은 [Fig. 3]에서 보는 바와 같이 X축은 선폭을 나타내는 것으로 피난구로 이용될 복도 위치를 기준으로 하여 기준점에서 7.5m와 19.5m를 지정하였다. Y축은 선박의 길이를 나타내는 것으로 30m, 60, 90m로 deck 길이가 103m임을 고려하여 30m간격으로 지정하였다. 그리고 Z축은 deck의 높이로 사람의 호흡선 위치인 바닥에서 1.5m를 지정하였다. 단, 화원은 [Fig. 3] & [Fig. 4]에서 보는바와 같이 중앙에 위치하기 때문에 우현과 좌현의 측정위치에서의 데이터는 거의 동일할 것으로 예상되어 이 중 우현만 지정하였다. 그리고 [Fig. 4]에서 보는 바와 같이 총 6개의 측정 데이터 중 화원에서 가장 가까운 위치에 있는 1번 가장 멀리 있는 3번에 대해 분석한다. 단, 공기조절장치는 작동이 불가하여 작동이 중지된 것으로 가정한다.

이 연구에서는 FDS를 이용한 시뮬레이션에서 인명 생존율을 분석하기 위해 대피한계 온도 및 가지거리를 파악한다. 선박에만 적용되는 기준이 없기 때문에 육상에 적용되는 소방방재청고시 제

2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 별표(1)의 내용을 기준으로 설정하였다 (Rie D.H and Lew J.O 2003). 온도 측정방법은 FPA방법을 사용하며 식(5)와 같다(KINS 2008).



[Fig. 4] Measuring point

$$\frac{\Delta T_g}{T_a} = 0.63 \left(\frac{\dot{Q}}{m \cdot C_p T_a} \right)^{0.72} \left(\frac{h_k A_T}{m \cdot C_p} \right)^{-0.36} \quad \text{식(5)}$$

여기서, ΔT_g : 고온 기체층 온도상승 (Tg-Ta) [K], T_a : 주위온도 [K], \dot{Q} : 화재의 열방출율 [kW], m : 강제 환기 유량 [kg/s], C_p : 비열 [kJ/kg K], h_k : 열전달 계수 [kW/m²], A_T : 공간 내의 총 면적 [m²]이다.

3. 화재 종류 및 크기별 결과 분석

화재 발생 시 인명의 위협은 온도 및 연기에 의한 질식이다. 소방방재청고시 제2014-31호 소방시설 등의 성능위주설계방법 및 기준의 별표(1)에 의하면 생존 가능 온도는 60 °C 그리고 가지거리 5m 확보가 필요하며 이를 대피허용한계값이라고 한다. 이 절에서는 화재의 크기와 대피허용한계값과의 관계를 분석하고자 한다. 화재의 종류 및 크기에 대한 온도를 분석한 결과는 <Table 2와 3>과 같다. 측정지점 1에 대하여 온도를 분석한 결과 첫 번째 목재 화재의 경우

100kW에서는 온도가 60℃까지 성장하지 않았으나 1MW인 경우는 59.4초, 2MW에서는 31.2초에 대피허용한계값인 60℃에 도달하였다. 두 번째, Polystyrene인 경우 100kW에서는 온도가 60℃까지 성장하지 않았으나 1MW인 경우는 90.1초, 2MW에서는 40.3초에 대피허용한계값인 60℃에 도달하였다. 세 번째, Kerosene 인 경우 100kW에서는 온도가 60℃까지 성장하지 않았으나 1MW인 경우는 60.1초, 2MW에서는 25.3초에 대피허용한계값인 60℃에 도달하였다. 종합결과, 화재의 크기가 100kW인 경우에는 대피허용한계온도인 60℃에 이 연구에서 수행한 시뮬레이션상의 모든 화재 종류에서 대피허용한계값인 60℃ 도달하지 않았다. 단, 1MW이상의 크기에서는 모든 화재의 종류에서 대피허용한계값인 60℃를 초과하였다. 단, 화재 발생지점에서 90m 떨어진 3번 측정지점에서는 모든 화재의 크기 및 종류에서 대피허용한계값인 60℃에 도달하지 않았다.

295.5초, 1MW인 경우는 50.4초, 2MW에서는 24.7초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다. 두 번째, Polystyrene인 경우 100kW에서는 가시거리가 103.9초, 1MW인 경우는 21.6초, 2MW에서는 9.1초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다. 세 번째, Kerosene 인 경우 100kW에서는 228초, 1MW인 경우는 44.5초, 2MW에서는 23.5초에 대피허용한계값인 5m에 도달하였다. 종합결과, 이 연구에서 수행한 시뮬레이션상의 모든 화재 종류 및 크기에서 대피허용한계값인 5m에 도달하였다.

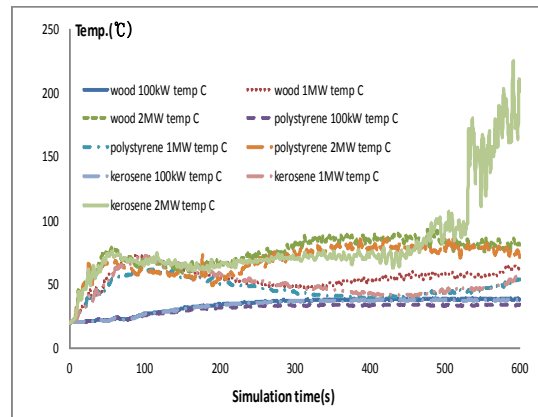
<Table 2> Time(s) to reach the temperature range of 60℃ (No. 1 Measuring point)

Type	100 kW	1 MW	2 MW
Wood	-	59.4	31.2
Polystyrene	-	90.1	40.3
Kerosene	-	60.1	25.3

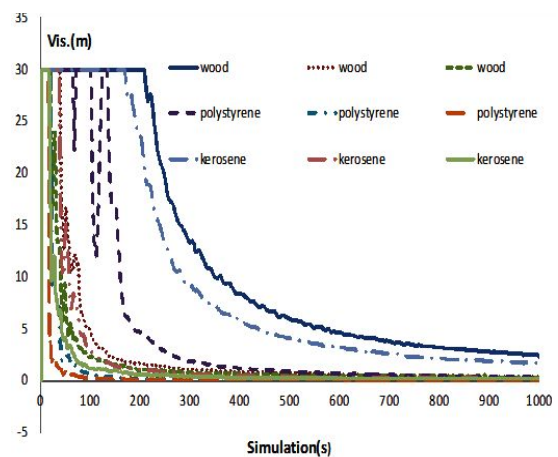
<Table 3> Time(s) to reach the temperature range of 60℃(No. 3 Measuring point)

Type	100 kW	1 MW	2 MW
Wood	-	-	-
Polystyrene	-	-	-
Kerosene	-	-	-

화재의 종류 및 크기에 대한 가시거리를 분석한 결과는 <Table 4>과 <Table 5>와 같다[9]. 측정지점 1에 대하여 가시거리를 분석한 결과 첫 번째 목재 화재의 경우 100kW에서는 가시거리가



[Fig. 5] Comparison of temperature variation with fire size and type



[Fig. 6] Comparison of visibility variation with fire size and type

<Table 4> Time(s) to reach the visibility range of 6m (No. 1 Measuring point)

Type	100 kW	1 MW	2 MW
Wood	295.5	50.4	24.7
Polystyrene	103.9	21.6	9.1
Kerosene	228	44.5	23.5

<Table 5> Time(s) to reach the visibility range of 6m (No. 3 Measuring point)

Type	100 kW	1 MW	2 MW
Wood	-	-	-
Polystyrene	-	-	-
Kerosene	-	-	-

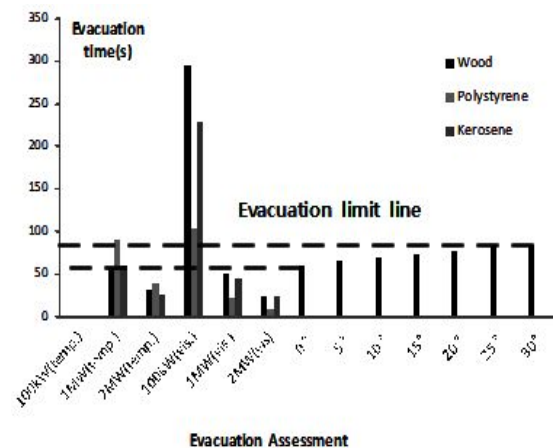
4. 피난 안전성 분석

측정지점 1 & 3에 대한 데이터를 계측한 결과 3번의 경우는 대피허용한계값인 60℃ 및 5m를 모든 조건에서 초과하지 않았다. 그러므로 1번 측정지점에 대하여 피난안전성을 분석하고자 한다. 1번 측정지점은 전체 면적에 30% 수준임을 감안하여 피난인원 105명에 대하여 피난 시간을 구하면 약 60초의 피난시간이 필요하다. 이 데이터를 이용하여 선박의 횡경사각에 의한 실제 피난시간을 구하면 <Table 6>과 같다.

<Table 6> Decrease rate according to Evacuation time of Evacuation Movement time

Heeling(°)	Decrease rate (%)	Evacuation time
0	0	60
5	8.4	65.0
10	16.1	69.7
15	23.3	74.0
20	30.0	78.0
25	36.3	81.8
30	42.3	85.4

[Fig. 7]은 화재의 크기 및 종류에 대한 피난안전성에 대한 종합결과를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 화재와 종류는 생존가능시간을 말하는 유효피난시간을 그래프로 표현하였으며 0° ~ 30°는 경사각에 의한 필요피난시간을 점선으로 표현하였다. 즉, 점선 위쪽에 해당하는 항목은 유효피난시간이 필요피난시간보다 길어 안전하다는 것이다. 피난반응시간을 제외한 피난이동시간만을 검토하면 모든 종류의 화재에서 크기가 100kW인 경우만 유효피난시간 이전에 피난을 완료하여 안전한 것으로 나타났다. 즉, 1MW 이상의 화재 발생 시에는 화재의 크기에 관계없이 피난 안전을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.



[Fig. 7] Results of Evacuation safety

IV. 결론

선박은 침몰, 화재 등 해양사고로 인해 피난을 감행해야하는 경우가 발생하는데 육상과 달리 피난공간이 해상이라는 2차적 위험에 처하게 된다.

현재, SOLAS에서는 퇴선시간을 화물선 10분, 여객선 30분으로 규정하고 있다. 하지만 이 규정은 모든 승객 및 승무원이 구명정에 탑승하여 진수하는 총 시간을 말하는 것으로 피난시간만을 지칭하는 것은 아니다. 즉, 집합장소까지의 피난

시간은 정하고 있지 않으나 운항자의 경험상 SOLAS에서 규정하는 퇴선시간의 최소 1/2이하는 되어야 할 것으로 보인다. 이 연구에서는 실제 여객선 A호를 대상으로 화재 발생을 인지하고 행동하는 피난반응시간과 실제 이동 시간인 피난 이동시간을 구하였다. 그리고 인명이 생존할 수 있는 시간인 유효피난시간을 구하기 위해 화재 분석 전문 프로그램인 FDS를 통해 화재의 크기별, 종류별로 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 선원 및 승객의 생존율을 높이기 위해서는 유효피난시간보다 필요피난시간(피난반응시간+피난이동시간)이 짧아야 한다. 피난반응시간을 제외한 실제 피난이동시간만을 검토하면 모든 종류의 화재에서 크기가 100kW인 경우에만 유효피난시간 이전에 피난을 완료하여 안전한 것으로 나타났다. 즉, 1MW 이상의 화재 발생 시에는 화재의 크기와 종류에 관계없이 피난안전을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 선원 및 승객들의 생존율을 높이기 위해 필요피난시간을 감소시키고 유효피난시간을 증가하는 지속적인 연구가 필요할 것이다.

system for fire on subway train vehicle,” Fire Science and Engineering, 17(2), 62~69.

Galea(2016), "EXODUS/SMARTFIRE Software: engineering Safety, Security and Efficiency through Simulation“, EXDOUS International Seminar on Evacuation Solutions, p. 29.

J. H. Choi(2016), “Building evacuation behavior database of Koreans for improving the reliability of the evacuation simulation, 45~61.

Korea Institute Of Nuclear Safety(2008). Development of Performance based Fire Hazard Analysis Method and Evaluation System(Evaluation of Fire Modeling), 19~20.

Korean Fire Protection Association(2005), The SFPE handbook of fire protection engineering, pp. (3-367)-(3-371).

M. K. Kim, W. H. Kim and Ichiro, Hagiwara(2003), "New Evaluation Method Safety in the Japanese Buildinh Standard Law ”, Fire Science and Engineering 2001 Fall conference, 17(2), 62~69.

Satoh, E. · Yoshikawa, T. · Yamada, A.(2006), Investigation of converted walking distance considering resistance of topographical features and changes in physical strength by age, Journal of Architecture Planning, Vol. 610, 133~139.

References

D. H. Rie and J. O. Lew(2003). “A study of heat & smoke evacuation characteristics by the changing of operational method of tunnel fan shaft ventilation

-
- Received : 20 July, 2016
 - Revised : 09 August, 2016
 - Accepted : 18 August, 2016